

VISIT...

LANZAROTE  
*Caliente*.COM

# Физические величины

---

СПРАВОЧНИК

Под редакцией  
И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова



МОСКВА  
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ  
1991



**Физические величины:** Справочник/А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с. — ISBN 5-283-04013-5

Приведены основные физические характеристики веществ, наиболее часто используемых в практике научных исследований и в технике. Представлены следующие разделы: механика, термодинамика, кинетические явления, электричество и магнетизм, оптика и лазеры, ядерная физика, астрономия и геофизика. Все величины приведены в СИ. Таблицы и графики сопровождаются краткими пояснениями и определениями соответствующих величин.

Для научных работников и инженеров различных специальностей.

Авторы: А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский, М. Е. Бродов, М. В. Быстров, Б. В. Виноградов, Л. И. Винокурова, Э. Б. Гельман, А. П. Генпе, И. С. Григорьев, К. Г. Гуртовой, В. С. Егоров, А. В. Елецкий, Л. К. Зарембо, В. Ю. Иванов, В. Л. Ивашинцева, В. В. Игнатьев, Р. М. Имамов, А. В. Инюшкин, Н. В. Кадобниова, И. И. Карасик, К. А. Кикоин, В. А. Криворучко, В. М. Кулаков, С. Д. Лазарев, Т. М. Лифшиц, Ю. Э. Любарский, С. В. Марин, И. А. Маслов, Е. З. Мейлихов, А. И. Мигачев, С. А. Миронов, А. Л. Мусатов, Ю. П. Никитин, Л. А. Новицкий, А. И. Обухов, В. И. Ожогин, Р. В. Писарев, Ю. В. Писаревский, В. С. Птускин, А. А. Радциг, В. П. Рудаков, Б. Д. Сумм, Р. А. Сюняев, М. Н. Хлопкин, И. Н. Хлюстиков, В. М. Черепанов, А. Г. Чертов, В. Г. Шапиро, В. М. Шустряков, С. С. Якимов, В. П. Яновский.

Рецензенты: А. А. Александров (гл. 13), Г. Н. Афанасьев (гл. 35, 38), О. А. Барсуков (гл. 43), Э. А. Бельская (гл. 15), Ю. П. Гайдуков (гл. 30), А. А. Горбатов (гл. 7), Ю. Н. Денисов (гл. 34), И. С. Желудев (гл. 2), Е. А. Иванов (гл. 36), С. С. Иванов (гл. 44), Д. Н. Каган (гл. 9), А. Д. Козлов (гл. 1), Н. С. Костюков (гл. 23), С. А. Ламзин (гл. 45), Р. З. Левитин (гл. 26, 27, 29), Ю. В. Мамонов (гл. 12), Б. А. Мамырин (гл. 1), В. П. Машкович (гл. 1), Н. М. Михин (гл. 6), А. Г. Мозговой (гл. 11), М. П. Орлова (гл. 8), В. В. Пашкевич (гл. 37, 40), В. Э. Пелецкий (гл. 21, 24, 31), В. А. Петухов (гл. 10), А. Н. Подмарьков (гл. 22), А. В. Пустогаров (гл. 25), В. В. Рошупкин (гл. 5), У. И. Сафронова (гл. 32), С. Н. Сковородько (гл. 4, 14), В. И. Соколов (гл. 28), Е. А. Ступицкий (гл. 18, 19), Л. П. Филиппов (гл. 16, 17, 20), В. И. Фурман (гл. 39), В. И. Цовбун (гл. 41, 42), М. В. Четкин (гл. 33), М. Ф. Шешнев (гл. 3)

Справочное издание

## ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Редакторы З. Д. Андреевко, О. П. Дунаева, Е. В. Сатарова  
Художественные редакторы А. Т. Кирьянов, А. А. Бслоус  
Технический редактор В. В. Ханаева  
Корректоры И. А. Володьева, М. Г. Гулина, З. Б. Драновская  
ИБ № 2264

Сдано в набор 28.04.87. Подписано в печать 21.02.89. Т-04136. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага имп. кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 129,36. Усл. кр.-отт. 129,78. Уч.-изд. л. 163,81. Тираж 50 000 экз. Заказ 2159. Цена 12 р. 00 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская Ордена Трудового Красного Знамени типография № 2 Госкомпечати СССР. Москва, 129301, пр. Мира, 105

Ф  $\frac{1604000000-271}{051(01)-91}$  КБ-8-27-90

© Авторы, 1991

ISBN 5-283-04013-5

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 8  | лота). Удельная теплоемкость. Молярная теплоемкость. Теплопроводность (коэффициент теплопроводности). Электрический заряд. Напряженность электрического поля. Электрический момент. Плотность тока. Удельное электрическое сопротивление. Удельная электрическая проводимость. Магнитная индукция. Магнитный поток. Напряженность магнитного поля. Магнитодвижущая сила. Магнитный момент. Яркость. Поглощенная доза. Эквивалентная доза. Активность нуклида в радиоактивном источнике. Экспозиционная доза рентгеновского и $\gamma$ -излучений . . . . . | 33 |
| Глава 1. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. А. Г. Чертов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 9  | 1.14. Фундаментальные физические постоянные . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 33 |
| 1.1. Общие положения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 9  | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 33 |
| 1.2. Единицы Международной системы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 9  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| Основные величины и единицы СИ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 9  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| Дополнительные единицы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 10 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| Производные единицы СИ по разделам физики . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 10 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| Пространство и время. Периодические и связанные с ними явления. Механика. Теплота. Электричество и магнетизм. Оптика. Акустика. Физическая химия и молекулярная физика. Атомная и ядерная физика . . . . .                                                                                                                                                                                                                       | 17 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.3. Рекомендуемые величины и единицы ионизирующих излучений . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 18 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| Величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле. Величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Дозиметрические величины и единицы. Величины и единицы, характеризующие источники ионизирующих излучений. О порядке внедрения ГОСТ 8.417—81 в области измерения ионизирующих излучений . . . . .                                                                  | 23 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 23 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.5. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 24 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.6. Перечень некоторых относительных и логарифмических величин и их единиц . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 24 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.7. Единицы, временно допускаемые к применению . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 24 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.8. Соотношения некоторых внесистемных единиц с единицами СИ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 25 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.9. Соотношения между единицами электромагнитных величин в системах СГС и СИ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 26 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.10. Соотношения внесистемных единиц радиоактивности и ионизирующих излучений с единицами СИ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 27 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.11. Соотношение системы атомных единиц Хартри $e = m_e = \hbar$ и системы релятивистских единиц $c = m_e = \hbar$ с единицами СИ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 28 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.12. Рекомендуемые кратные и дольные единицы от единиц СИ и от единиц, применяемых наравне с единицами СИ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 28 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| 1.13. Соотношения между единицами физических величин . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 29 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
| Длина. Площадь. Объем. Плоский угол. Телесный угол. Время. Температура. Скорость. Ускорение. Угловая скорость. Частота вращения. Масса. Плотность. Линейная плотность. Сила. Давление. Импульс (количество движения). Момент силы. Момент импульса (момент количества движения). Напряжение (механическое). Работа, энергия. Мощность. Динамическая вязкость. Кинематическая вязкость. Объемный расход. Количество теплоты (теп- | 30 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Глава 2. СИММЕТРИЙНОЕ И ТЕНЗОРНОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ. Ю. В. Писаревский . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 34 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 2.1. Симметрия кристаллов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 34 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Точечные группы. Кристаллографические классы. Пространственные группы симметрии. Магнитная симметрия. Предельные группы. Кристаллографическая система координат . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 39 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 2.2. Физические свойства кристаллов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 41 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Кристаллографическая система координат . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 41 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Симметрия физических свойств. Матричное описание физических свойств кристаллов. Влияние внешнего воздействия . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 45 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 45 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ. Н. В. Кадобнова, А. М. Братковский . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 46 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 3.1. Общие сведения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 46 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 3.2. Механические свойства при температуре 20°C . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 46 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Металлы. Стали. Алюминиевые сплавы. Титановые сплавы. Магниево-сплавы. Медные сплавы и сплавы на основе олова и свинца. Жаропрочные сплавы и сплавы на основе тугоплавких металлов. Композиционные материалы. Пластмассы, металлокерамика и другие материалы. Минералы и волокна . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                 | 64 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 3.3. Механические свойства при низких и высоких температурах . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 66 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 3.4. Выносливость материалов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 77 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 3.5. Характеристики разрушения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 80 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 3.6. Механические свойства аморфных металлов и сплавов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 83 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 85 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Глава 4. СЖИМАЕМОСТЬ. Б. В. Виноградов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 86 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 4.1. Введение . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 86 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 4.2. Сжимаемость твердых тел . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 87 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | 4.3. Сжимаемость жидкостей и газов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 94 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 97 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 5. ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ. А. П. Бачив</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                               | 98  | <b>Глава 10. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ. Э. Б. Гельман</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                 | 222 |
| 5.1. Введение . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 98  | 10.1. Введение . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 222 |
| 5.2. Элементы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 99  | 10.2. Температурные коэффициенты линейного расширения твердых тел . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                     | 223 |
| 5.3. Неорганические вещества . . . . .                                                                                                                                                                                                                                 | 100 | Элементы в кристаллическом состоянии. Индивидуальные соединения. Неорганические соединения при температуре выше 1000 К. Кварцевые и оптические стекла. Технические стекла. Ситаллы. Чугуны. Стали, хром-никелевые, хром-кобальтовые и другие сплавы. Цветные металлы и сплавы. Алюминиевые сплавы. Пластмассы. Строительные материалы . . . . . | 251 |
| 5.4. Органические вещества . . . . .                                                                                                                                                                                                                                   | 111 | 10.3. Температурные коэффициенты объемного расширения жидкостей и газов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                               | 251 |
| 5.5. Сплавы, минералы, дерево и другие твердые вещества . . . . .                                                                                                                                                                                                      | 120 | Элементы и неорганические соединения. Органические соединения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                         | 252 |
| 5.6. Пластмассы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                              | 122 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 253 |
| 5.7. Жидкости . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 123 | <b>Глава 11. ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ. В. В. Игнатьев, В. А. Криворучко, А. И. Мигачев</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                           | 254 |
| 5.8. Ртуть при различной температуре и атмосферном давлении . . . . .                                                                                                                                                                                                  | 123 | 11.1. Пары воды . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 254 |
| 5.9. Дистиллированная вода при различной температуре и атмосферном давлении . . . . .                                                                                                                                                                                  | 124 | 11.2. Пары неорганических веществ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 255 |
| <b>Список литературы</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 124 | 11.3. Пары органических веществ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 268 |
| <b>Глава 6. ТРЕНИЕ. И. И. Карасик</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                        | 124 | 11.4. Коэффициент разделения изотопных молекул . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 284 |
| 6.1. Введение . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 124 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 286 |
| 6.2. Адгезионная связь при трении скольжения . . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 126 | <b>Глава 12. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ. Э. Б. Гельман</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 288 |
| 6.3. Трение покоя . . . . .                                                                                                                                                                                                                                            | 127 | 12.1. Введение . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 288 |
| 6.4. Трение скольжения без смазывания . . . . .                                                                                                                                                                                                                        | 128 | 12.2. Плавление и кипение при постоянном давлении . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 288 |
| 6.5. Трение смазанных поверхностей и твердосмазочных покрытий . . . . .                                                                                                                                                                                                | 130 | Элементы. Неорганические соединения. Органические соединения. Полупроводниковые и оптические материалы. Высокотемпературные материалы. Стали и промышленные сплавы. Двухкомпонентные сплавы. Легкоплавкие сплавы. Стекла. Полимерные материалы. Топливо, масло, гидравлические жидкости. Хладоны и теплоносители . . . . .                      | 309 |
| 6.6. Трение по льду и снегу . . . . .                                                                                                                                                                                                                                  | 131 | 12.3. Плавление и кипение в зависимости от давления . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 309 |
| 6.7. Трение в вакууме . . . . .                                                                                                                                                                                                                                        | 131 | Элементы. Неорганические соединения. Органические соединения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                          | 314 |
| 6.8. Трение качения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                          | 132 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 314 |
| <b>Список литературы</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 132 | <b>Глава 13. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ. Э. Б. Гельман</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                   | 315 |
| <b>Глава 7. АКУСТИКА. Л. К. Зарембо</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                      | 133 | 13.1. Уравнение состояния твердого тела . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 315 |
| 7.1. Введение . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                | 133 | Постоянная Грюнейзена и параметры уравнения состояния Миг — Грюнейзена некоторых веществ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                              | 315 |
| 7.2. Распространение звука в газах и парах. Скорость звука. Затухание звука . . . . .                                                                                                                                                                                  | 134 | 13.2. Уравнение состояния газа . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 315 |
| 7.3. Распространение звука в жидкостях . . . . .                                                                                                                                                                                                                       | 137 | Второй вириальный коэффициент. Третий вириальный коэффициент . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                          | 317 |
| Скорость звука. Нелинейные механические характеристики жидкостей. Поглощение звука в жидкостях . . . . .                                                                                                                                                               | 148 | 13.3. Критические параметры веществ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 317 |
| 7.4. Распространение звука в твердых телах . . . . .                                                                                                                                                                                                                   | 156 | Простые вещества. Неорганические соединения. Органические соединения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                  | 328 |
| <b>Список литературы</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 166 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 329 |
| <b>Глава 8. ТЕРМОМЕТРИЯ. А. В. Инюшкин</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                   | 172 | <b>Глава 14. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ. Б. Д. Сумм</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 330 |
| 8.1. Общие сведения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                          | 172 | 14.1. Введение . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 330 |
| 8.2. Температурные шкалы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 172 | 14.2. Сжиженные газы . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 331 |
| 8.3. Жидкостно-стеклянные термометры . . . . .                                                                                                                                                                                                                         | 178 | 14.3. Вода . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 332 |
| 8.4. Термометры сопротивления . . . . .                                                                                                                                                                                                                                | 179 | 14.4. Органические вещества . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 332 |
| 8.5. Термоэлектрические термометры . . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 179 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 8.6. Конденсационные термометры . . . . .                                                                                                                                                                                                                              | 187 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 8.7. Оптическая пирометрия . . . . .                                                                                                                                                                                                                                   | 191 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 8.8. Термоиндикаторы и кристаллические измерители максимальной температуры . . . . .                                                                                                                                                                                   | 194 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| <b>Список литературы</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 195 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| <b>Глава 9. ТЕПЛОЕМКОСТЬ. М. Н. Хлопкин</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                  | 197 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 9.1. Общие сведения . . . . .                                                                                                                                                                                                                                          | 197 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| Определение и единицы теплоемкости. Теплоемкость твердых тел. Теплоемкость разреженных газов. Теплоемкость плотных газов и жидкостей. Теплоемкость сплавов, растворов и смесей. Теплоемкость вблизи фазовых переходов. Справочная литература по теплоемкости . . . . . | 198 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 9.2. Теплоемкость элементов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                  | 198 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 9.3. Теплоемкость неорганических соединений . . . . .                                                                                                                                                                                                                  | 207 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 9.4. Теплоемкость органических соединений . . . . .                                                                                                                                                                                                                    | 214 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 9.5. Теплоемкость растворов, смесей, сплавов и технических материалов . . . . .                                                                                                                                                                                        | 217 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| <b>Список литературы</b> . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 220 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |

|                                                     |     |                                                                      |     |
|-----------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.5. Жидкие металлы . . . . .                      | 335 | Глава 21. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА                                     |     |
| 14.6. Расплавы солей . . . . .                      | 336 | МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. В. С. Егоров,                                    |     |
| 14.7. Твердые металлы . . . . .                     | 337 | И. Н. Хлюстиков . . . . .                                            | 437 |
| Список литературы . . . . .                         | 337 | 21.1. Введение . . . . .                                             | 437 |
| Глава 15 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.                          |     | 21.2. Чистые металлы . . . . .                                       | 438 |
| А. В. Инюшкин . . . . .                             | 337 | 21.3. Влияние всестороннего сжатия на сопро-                         |     |
| 15.1. Общие сведения . . . . .                      | 337 | тивление металлов . . . . .                                          | 440 |
| 15.2. Теплопроводность простейших химических        |     | 21.4. Электрические свойства некоторых метал-                        |     |
| веществ . . . . .                                   | 338 | лов и сплавов . . . . .                                              | 444 |
| 15.3. Теплопроводность газов и паров . . . . .      | 339 | 21.5. Сверхпроводники . . . . .                                      | 448 |
| 15.4. Теплопроводность жидкостей . . . . .          | 339 | Список литературы . . . . .                                          | 453 |
| 15.5. Теплопроводность твердых тел . . . . .        | 339 |                                                                      |     |
| Список литературы . . . . .                         | 363 | Глава 22. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙ-                                    |     |
| Глава 16. ВЯЗКОСТЬ. А. В. Елецкий . . . . .         | 364 | СТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ. С. Д. Лазарев.                                 |     |
| 16.1. Введение . . . . .                            | 364 | Е. З. Мейлихов . . . . .                                             | 454 |
| 16.2. Вязкость газов . . . . .                      | 364 | 22.1. Введение . . . . .                                             | 454 |
| 16.3. Вязкость жидкостей . . . . .                  | 370 | 22.2. Элементарные полупроводники . . . . .                          | 455 |
| Список литературы . . . . .                         | 374 | 22.2.1. Кремний и германий . . . . .                                 | 455 |
| Глава 17. ДИФФУЗИЯ. А. В. Елецкий . . . . .         | 375 | 22.3. Полупроводниковые соединения . . . . .                         | 469 |
| 17.1. Введение . . . . .                            | 375 | 22.3.1. Соединения типа $A^I B^I - A^I B^{VII}$ . . . . .            | 469 |
| 17.2. Диффузия атомов и молекул в газах . . . . .   | 375 | 22.3.2. Соединения типа $A^{II} B^{IV} - A^{II} B^{VII}$ . . . . .   | 469 |
| 17.3. Диффузия в жидкостях . . . . .                | 376 | 22.3.3. Соединения типа $A^{III} B^{IV} - A^{III} B^{VII}$ . . . . . | 500 |
| 17.4. Диффузия в твердых веществах . . . . .        | 378 | 22.3.4. Соединения типа $A^{IV} B^{IV} - A^{IV} B^{VI}$ . . . . .    | 517 |
| Список литературы . . . . .                         | 390 | 22.3.5. Соединения типа $A^{VB} B^V - A^{VB} B^{VIII}$ . . . . .     | 530 |
| Глава 18. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В                   |     | 22.3.6. Соединения типа $A^{VI} B^{IV} - A^{VI} B^{VI}$ . . . . .    | 535 |
| ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ. А. В. Елецкий . . . . .             | 391 | 22.3.7. Соединения типа $A^{VII} B^{III} - A^{VII} B^{VI}$ . . . . . | 537 |
| 18.1. Колебательная релаксация молекул в га-        |     | 22.3.8. Соединения типа $A^{III} B^V - A^{III} B^{VI}$ . . . . .     | 537 |
| зах . . . . .                                       | 391 | Список литературы . . . . .                                          | 538 |
| 18.2. Рассеяние электронов на атомах и моле-        |     | Глава 23. ДИЭЛЕКТРИКИ. А. П. Генне . . . . .                         | 543 |
| кулах . . . . .                                     | 393 | 23.1. Общие сведения . . . . .                                       | 543 |
| 18.3. Процессы ионизации с участием возбуж-         |     | 23.2. Газообразные диэлектрики . . . . .                             | 545 |
| денных атомов . . . . .                             | 395 | 23.3. Жидкие диэлектрики . . . . .                                   | 548 |
| 18.4. Процессы резонансной перезарядки . . . . .    | 395 | 23.4. Твердые диэлектрики . . . . .                                  | 549 |
| 18.5. Ионио-молекулярные реакции . . . . .          | 396 | 23.5. Активные диэлектрики . . . . .                                 | 557 |
| 18.6. Процессы нейтрализации заряженных час-        |     | Список литературы . . . . .                                          | 559 |
| тиц в плазме . . . . .                              | 398 |                                                                      |     |
| 18.7. Процессы образования и разрушения отри-       |     | Глава 24. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВ-                                     |     |
| цательных ионов . . . . .                           | 399 | ЛЕНИЯ. Н. А. Бабушкина. . . . .                                      | 559 |
| 18.8. Процессы тушения возбужденных атомов          |     | Список литературы . . . . .                                          | 566 |
| и молекул при столкновениях с тяжелыми              |     |                                                                      |     |
| частицами . . . . .                                 | 407 | Глава 25. ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ                                       |     |
| 18.9. Фотоионизация и фоторекомбинация . . . . .    | 409 | ЭМИССИЯ. Т. М. Лифшиц, А. Л. Мусатов . . . . .                       | 567 |
| Список литературы . . . . .                         | 410 | 25.1. Вводные замечания . . . . .                                    | 567 |
| Глава 19. ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ и МОЛЕ-                  |     | 25.2. Работа выхода . . . . .                                        | 567 |
| КУЛ. А. А. Радциг, В. М. Шустряков . . . . .        | 411 | 25.3. Термоэлектронная эмиссия . . . . .                             | 570 |
| 19.1. Введение . . . . .                            | 411 | 25.4. Фотоэлектронная эмиссия . . . . .                              | 574 |
| 19.2. Потенциал ионизации атомных и молеку-         |     | 25.5. Вторичная электронная эмиссия . . . . .                        | 582 |
| лярных частиц . . . . .                             | 411 | 25.6. Полевая электронная эмиссия . . . . .                          | 587 |
| 19.3. Энергия связи электронов во внутренних        |     | 25.7. Ионная и ионно-электронная эмиссия . . . . .                   | 590 |
| оболочках атомов . . . . .                          | 420 | Список литературы . . . . .                                          | 592 |
| 19.4. Энергия сродства атомов и молекул к           |     | Глава 26. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА-                                    |     |
| электрону . . . . .                                 | 420 | И ПАРАМАГНЕТИКОВ. В. Ю. Иванов,                                      |     |
| 19.5. Энергия сродства атомов и молекул к про-      |     | Л. И. Винокурова . . . . .                                           | 593 |
| тону . . . . .                                      | 420 | Список литературы . . . . .                                          | 610 |
| 19.6. Эффективные сечения ионизации атомов и        |     |                                                                      |     |
| молекул электронами . . . . .                       | 422 | Глава 27. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕР-                                    |     |
| Список литературы . . . . .                         | 429 | РОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.                                      |     |
| Глава 20. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В СЛАБО-                 |     | К. Г. Гуртовой . . . . .                                             | 613 |
| ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ. А. В. Елецкий . . . . .        | 430 | 27.1. Вводные замечания . . . . .                                    | 613 |
| 20.1. Диффузия и подвижность заряженных             |     | 27.2. Элементы . . . . .                                             | 614 |
| частиц в слабоионизованной плазме . . . . .         | 430 | 27.3. Сплавы . . . . .                                               | 623 |
| 20.2. Вязкость слабоионизованной плазмы . . . . .   | 436 | 27.4. Металлические магнитные материалы . . . . .                    | 636 |
| 20.3. Теплопроводность ионизованного газа . . . . . | 436 | Список литературы . . . . .                                          | 646 |
| Список литературы . . . . .                         | 437 |                                                                      |     |

|                                                                                                                           |     |                                                                                                                        |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 28. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ.<br>В. И. Ожогин, В. Г. Шапиро . . . . .                                                     | 648 | 32.4. Сверхтонкая структура уровней энергии атомов . . . . .                                                           | 839 |
| 28.1. Вводные замечания . . . . .                                                                                         | 648 | 32.5. Изотопическая структура атомных спектров . . . . .                                                               | 846 |
| 28.2. Основные магнитные свойства легкоосных антиферромагнетиков (на примере $MnF_2$ ) . . . . .                          | 648 | 32.6. Спектры двухатомных молекул . . . . .                                                                            | 849 |
| 28.3. Основные магнитные свойства легкоплоскостных антиферромагнетиков (на примере $MnCO_3$ , $CoCO_3$ ) . . . . .        | 650 | Список литературы . . . . .                                                                                            | 859 |
| 28.4. Метамагнетики . . . . .                                                                                             | 651 | Глава 33. ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО-, ПЬЕЗО-ОПТИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. М. Е. Бродов, В. П. Яновский . . . . . | 860 |
| 28.5. Антиферромагнетики со взаимодействием Дзялошинского . . . . .                                                       | 651 | 33.1. Общие сведения . . . . .                                                                                         | 860 |
| 28.6. Пьезомагнетики и магнитоэлектрики . . . . .                                                                         | 652 | 33.2. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) . . . . .                                                   | 860 |
| 28.7. Акустомагнетики . . . . .                                                                                           | 652 | 33.3. Магнитное вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея) . . . . .                                              | 865 |
| 28.8. Органические сверхпроводники . . . . .                                                                              | 652 | 33.4. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) . . . . .                                                   | 872 |
| 28.9. Некоторые свойства антиферромагнетиков . . . . .                                                                    | 652 | 33.5. Эффект фотоупругости . . . . .                                                                                   | 873 |
| Список литературы . . . . .                                                                                               | 705 | 33.6. Оптическая активность . . . . .                                                                                  | 877 |
| Глава 29. ФЕРРИТЫ И ДРУГИЕ МАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ. М. В. Быстров, В. Л. Ивашинцева, С. А. Миронов, Р. В. Писарев . . . . . | 707 | 33.7. Генерация второй гармоники в кристаллах. Показатели преломления нелинейных кристаллов . . . . .                  | 884 |
| 29.1. Общие сведения . . . . .                                                                                            | 709 | 33.8. Вынужденное рассеяние света . . . . .                                                                            | 893 |
| 29.2. Ферриты-шпинели . . . . .                                                                                           | 709 | Список литературы . . . . .                                                                                            | 894 |
| А. Простые ферриты . . . . .                                                                                              | 710 | Глава 34. ЛАЗЕРЫ. М. Е. Бродов, В. П. Яновский . . . . .                                                               | 895 |
| Б. Смешанные ферриты . . . . .                                                                                            | 716 | 34.1. Вводные замечания . . . . .                                                                                      | 895 |
| 29.3. Ферриты со структурой граната . . . . .                                                                             | 726 | 34.2. Газовые лазеры . . . . .                                                                                         | 895 |
| 29.4. Гексагональные ферриты . . . . .                                                                                    | 732 | 34.3. Лазеры на примесных кристаллах . . . . .                                                                         | 924 |
| 29.5. Некоторые ферро- и ферримагнитные диэлектрики . . . . .                                                             | 733 | 34.4. Характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол . . . . .                                                 | 943 |
| Список литературы . . . . .                                                                                               | 733 | 34.5. Полупроводниковые лазеры . . . . .                                                                               | 946 |
| Глава 30. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. Н. А. Бабушкина . . . . .                                           | 736 | 34.6. Жидкостные лазеры с редкоземельными активаторами . . . . .                                                       | 948 |
| 30.1. Общие сведения . . . . .                                                                                            | 736 | 34.7. Лазеры на красителях . . . . .                                                                                   | 950 |
| 30.2. Топология поверхности Ферми металлов . . . . .                                                                      | 739 | 34.8. Твердотельные лазеры на центрах окраски . . . . .                                                                | 957 |
| 30.3. Влияние магнитного поля на электрическое сопротивление металлов . . . . .                                           | 744 | Список литературы . . . . .                                                                                            | 958 |
| 30.4. Коэффициенты Холла металлов . . . . .                                                                               | 755 | Глава 35. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. Р. М. Имамов . . . . .                                                              | 959 |
| 30.5. Коэффициенты Холла ферромагнетиков и редкоземельных металлов . . . . .                                              | 760 | 35.1. Получение и свойства рентгеновского излучения . . . . .                                                          | 959 |
| 30.6. Термомагнитные коэффициенты металлов . . . . .                                                                      | 763 | 35.2. Характеристический спектр рентгеновского излучения . . . . .                                                     | 959 |
| Список литературы . . . . .                                                                                               | 764 | 35.3. Длины волн основных линий и краев поглощения рентгеновского излучения . . . . .                                  | 961 |
| Глава 31. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ. Л. А. Новицкий . . . . .                                                           | 766 | 35.4. Ширина линий рентгеновского излучения . . . . .                                                                  | 964 |
| 31.1. Общие сведения . . . . .                                                                                            | 766 | 35.5. Относительные интенсивности линий . . . . .                                                                      | 966 |
| 31.2. Оптические стекла . . . . .                                                                                         | 770 | 35.6. Взаимодействия рентгеновского излучения с веществом . . . . .                                                    | 966 |
| 31.3. Поляризационные, магнитооптические и электрооптические материалы . . . . .                                          | 775 | 35.7. Вторичные спектры и эффекты химической связи в рентгеновской спектроскопии . . . . .                             | 968 |
| 31.4. Оптические кристаллы и оптическая керамика . . . . .                                                                | 777 | Список литературы . . . . .                                                                                            | 970 |
| 31.5. Лакокрасочные материалы . . . . .                                                                                   | 778 | Глава 36. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. Ю. П. Никитин . . . . .                                                                | 970 |
| 31.6. Металлы и сплавы . . . . .                                                                                          | 779 | 36.1. Вводные замечания . . . . .                                                                                      | 970 |
| 31.7. Графитовые материалы . . . . .                                                                                      | 785 | 36.2. Классификация взаимодействий и основные группы элементарных частиц . . . . .                                     | 970 |
| 31.8. Полимерные материалы . . . . .                                                                                      | 785 | 36.3. Законы сохранения и внутренние симметрии . . . . .                                                               | 971 |
| 31.9. Строительные материалы . . . . .                                                                                    | 786 | 36.4. Кварковая структура адронов . . . . .                                                                            | 971 |
| 31.10. Окислы, бориды, карбиды и нитриды тугоплавких металлов . . . . .                                                   | 788 | 36.5. Электрослабое и сильное взаимодействия . . . . .                                                                 | 973 |
| 31.11. Земные покровы и природные минералы . . . . .                                                                      | 788 | 36.6. Элементарные частицы, стабильные по отношению к распадам по сильному взаимодействию . . . . .                    | 973 |
| 31.12. Лунные грунты . . . . .                                                                                            | 789 | 36.7. Мезонные резонансы . . . . .                                                                                     | 992 |
| 31.13. Жидкости, отвержденные вещества . . . . .                                                                          | 790 | 36.8. Барийонные резонансы . . . . .                                                                                   | 992 |
| 31.14. Газы и плазма . . . . .                                                                                            | 791 |                                                                                                                        |     |
| Список литературы . . . . .                                                                                               | 793 |                                                                                                                        |     |
| Глава 32. СПЕКТРЫ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ. А. А. Радциг . . . . .                                                                | 794 |                                                                                                                        |     |
| 32.1. Введение . . . . .                                                                                                  | 794 |                                                                                                                        |     |
| 32.2. Оптические спектры атомов . . . . .                                                                                 | 794 |                                                                                                                        |     |
| 32.3. Тонкая структура уровней энергии атомов . . . . .                                                                   | 838 |                                                                                                                        |     |

|                                                                                                    |      |                                                                                                                                                                                                                                    |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 36.9. Магнитные моменты элементарных частиц . . . . .                                              | 992  | 41.12. Активационные детекторы . . . . .                                                                                                                                                                                           | 1134 |
| 36.10. Параметры распадов элементарных частиц . . . . .                                            | 993  | 41.13. Замедление нейтронов . . . . .                                                                                                                                                                                              | 1137 |
| Список литературы . . . . .                                                                        | 993  | 41.14. Диффузия нейтронов . . . . .                                                                                                                                                                                                | 1138 |
| Глава 37. ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ. В. М. Кулаков . . . . .                                       | 993  | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                        | 1139 |
| 37.1. Таблица нуклидов . . . . .                                                                   | 993  | Глава 42. ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО. В. П. Рудаков . . . . .                                                                                                                                              | 1141 |
| 37.2. Эталонные энергии $\gamma$ -излучения, $\alpha$ -частиц и конверсионных электронов . . . . . | 1044 | 42.1. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество . . . . .                                                                                                                                                               | 1141 |
| 37.3. Квантовые характеристики ядер . . . . .                                                      | 1047 | 42.2. Многократное рассеяние при прохождении заряженных частиц через вещество . . . . .                                                                                                                                            | 1167 |
| 37.4. Радиоактивные ряды . . . . .                                                                 | 1051 | 42.3. Прохождение электронов через вещество . . . . .                                                                                                                                                                              | 1170 |
| Список литературы . . . . .                                                                        | 1054 | 42.4. Прохождение гамма-излучения через вещество . . . . .                                                                                                                                                                         | 1170 |
| Глава 38. МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА. С. С. Якимов, В. М. Черепанов . . . . .                            | 1054 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                        | 1172 |
| 38.1. Общие сведения . . . . .                                                                     | 1054 | Глава 43. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ. В. С. Птускин . . . . .                                                                                                                                                                                | 1173 |
| 38.2. Характеристики мёссбауэровских ядер . . . . .                                                | 1055 | 43.1. Источники космических лучей . . . . .                                                                                                                                                                                        | 1173 |
| 38.3. Параметры мёссбауэровских спектров . . . . .                                                 | 1062 | 43.2. Галактические космические лучи . . . . .                                                                                                                                                                                     | 1173 |
| 38.4. Изомерный сдвиг . . . . .                                                                    | 1066 | 43.3. Модуляция галактических космических лучей в межпланетном пространстве . . . . .                                                                                                                                              | 1175 |
| Список литературы . . . . .                                                                        | 1068 | 43.4. Солнечные космические лучи . . . . .                                                                                                                                                                                         | 1176 |
| Глава 39. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. В. П. Рудаков . . . . .                                                 | 1068 | 43.5. Геомагнитные эффекты . . . . .                                                                                                                                                                                               | 1178 |
| 39.1. Вводные замечания . . . . .                                                                  | 1068 | 43.6. Космические лучи в атмосфере Земли . . . . .                                                                                                                                                                                 | 1178 |
| 39.2. Сечение резерфордского рассеяния . . . . .                                                   | 1069 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                        | 1179 |
| 39.3. Энергия ядерной реакции . . . . .                                                            | 1069 | Глава 44. ФИЗИКА ЗЕМЛИ. И. А. Маслов . . . . .                                                                                                                                                                                     | 1180 |
| 39.4. Порог ядерной реакции . . . . .                                                              | 1085 | 44.1. Общие характеристики Земли . . . . .                                                                                                                                                                                         | 1180 |
| 39.5. Кулоновский барьер . . . . .                                                                 | 1086 | Фигура Земли . . . . .                                                                                                                                                                                                             | 1180 |
| 39.6. Кинематика ядерных реакций . . . . .                                                         | 1086 | Строение Земли . . . . .                                                                                                                                                                                                           | 1180 |
| Список литературы . . . . .                                                                        | 1087 | 44.2. Литосфера . . . . .                                                                                                                                                                                                          | 1181 |
| Глава 40. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР. А. И. Обухов, И. С. Григорьев . . . . .                                    | 1087 | Состав и свойства. Поле силы тяжести. Сейсмичность. Магнитное поле. Тепловое поле . . . . .                                                                                                                                        | 1187 |
| 40.1. Вводные замечания . . . . .                                                                  | 1087 | 44.3. Гидросфера . . . . .                                                                                                                                                                                                         | 1188 |
| 40.2. Барьеры деления ядер . . . . .                                                               | 1088 | Мировой океан. Состав и свойства вод. Физические свойства океанической воды и льда. Физические свойства морского льда. Оптические свойства океанической воды. Радиоактивность океанической воды. Скорость звука в океане . . . . . | 1192 |
| 40.3. Спонтанное деление . . . . .                                                                 | 1089 | 44.4. Атмосфера . . . . .                                                                                                                                                                                                          | 1192 |
| 40.4. Сечения деления ядер . . . . .                                                               | 1091 | Строение атмосферы. Радиационный баланс атмосферы. Электрические явления в атмосфере . . . . .                                                                                                                                     | 1195 |
| 40.5. Энергия, выделяемая при делении . . . . .                                                    | 1093 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                        | 1196 |
| 40.6. Продукты деления ядер . . . . .                                                              | 1094 | Глава 45. АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА. Ю. Э. Любарский, Р. А. Сюняев . . . . .                                                                                                                                                        | 1197 |
| 40.7. Нейтроны деления . . . . .                                                                   | 1095 | 45.1. Некоторые астрономические единицы и постоянные . . . . .                                                                                                                                                                     | 1197 |
| 40.8. Мгновенное $\gamma$ -излучение . . . . .                                                     | 1099 | 45.2. Солнце . . . . .                                                                                                                                                                                                             | 1198 |
| 40.9. Запаздывающее излучение продуктов деления . . . . .                                          | 1095 | 45.3. Планеты и спутники, межпланетная среда . . . . .                                                                                                                                                                             | 1201 |
| Список литературы . . . . .                                                                        | 1096 | 45.4. Звезды . . . . .                                                                                                                                                                                                             | 1208 |
| Глава 41. ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО. С. В. Марин . . . . .                              | 1099 | 45.5. Наша Галактика . . . . .                                                                                                                                                                                                     | 1214 |
| 41.1. Общие замечания . . . . .                                                                    | 1099 | 45.6. Галактики и Вселенная . . . . .                                                                                                                                                                                              | 1223 |
| 41.2. Основные характеристики нейтрона . . . . .                                                   | 1100 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                        | 1229 |
| 41.3. Нейтронные сечения . . . . .                                                                 | 1101 | Глава 46. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ. К. А. Кикоин . . . . .                                                                                                                                                                  | 1231 |
| 41.4. Механизм ядерных реакций с участием нейтронов . . . . .                                      | 1102 | Список литературы . . . . .                                                                                                                                                                                                        | 1232 |
| 41.5. Сечения ядерных реакций для нейтронов тепловой энергии . . . . .                             | 1102 |                                                                                                                                                                                                                                    |      |
| 41.6. Графики зависимости полных сечений от энергии . . . . .                                      | 1114 |                                                                                                                                                                                                                                    |      |
| 41.7. Резонансные интегралы . . . . .                                                              | 1122 |                                                                                                                                                                                                                                    |      |
| 41.8. Ядерная реакция ( $n$ , $2n$ ) . . . . .                                                     | 1127 |                                                                                                                                                                                                                                    |      |
| 41.9. Ядерная реакция ( $n$ , $p$ ) . . . . .                                                      | 1134 |                                                                                                                                                                                                                                    |      |
| 41.10. Ядерная реакция ( $n$ , $\alpha$ ) . . . . .                                                | 1134 |                                                                                                                                                                                                                                    |      |
| 41.11. Ядерная реакция ( $n$ , $t$ ) . . . . .                                                     | 1134 |                                                                                                                                                                                                                                    |      |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Более 10 лет назад под редакцией академика И. К. Кикоина был издан универсальный справочник «Таблицы физических величин», который стал достаточно популярным среди специалистов различного ранга. Однако любой справочник при всех своих достоинствах со временем неизбежно устаревает. Не избежали этого и «Таблицы физических величин». Сначала казалось, что исправить их можно «косметическими» методами — устранением ошибок, небольшой корректировкой и дополнениями. Но с течением времени стало ясно, что необходима более глубокая, а в ряде случаев и коренная переработка материала с привлечением новых физических данных и с новым коллективом авторов. Так родилась идея издания нового универсального физического справочника. Однако воплотить ее в жизнь Иссаак Константинович не успел: под его руководством была выработана лишь общая концепция справочника и намечен коллектив авторов. На протяжении работы, которую нам пришлось выполнять уже без него, мы неоднократно сталкивались с различного рода сложными ситуациями и трудностями (касающимися отбора материала, его подачи, сложностей общения с большим коллективом авторов и т. д.), решение которых оказалось возможным в значительной мере благодаря обращению к тем идеям и принципам, которые были выработаны в совместных обсуждениях с И. К. Киконным. Поэтому все возможные достоинства справочника должны быть связаны с его именем, в то время как за все недостатки целиком и полностью отвечаем мы.

При работе над таким универсальным физическим справочником, коим, по нашему мнению, должен был стать справочник «Физические величины», необходимо было ясно представить себе его будущих пользователей. Для нас это — специалисты различного уровня (студенты, аспиранты, инженеры, научные работники), испытывающие потребность в конкретной числовой информации, не относящейся к их узкой специализации. В соответствии с этим мы старались отобрать для справочника та-

кой материал, который мог бы помочь пользователям в их повседневной работе, а форма его подачи давала бы возможность легко использовать такой материал неспециалистам. Поэтому мы сочли необходимым дать в каждой главе сводку основных понятий соответствующего раздела физики, привести единицы наиболее важных физических величин и, по возможности, дать ссылки на более специализированные издания. При отборе числовых данных мы ограничивались, как правило, наиболее надежными из них (хотя, справедливости ради, следует сказать, что критерии надежности по необходимости весьма субъективны и различны у разных авторов). Там, где это было возможно и удобно, данные представлены всегда в виде графиков и рисунков. Другая проблема, стоявшая перед нами, — избежать дублирования данных в различных главах. В противном случае объем справочника стал бы непомерно большим. Полнота охвата материала в справочнике и его тематическая разнородность привели к тому, что единообразия подачи материала выдержать по всем главам в полной мере не удалось. Не исключено, что эта задача вообще неразрешима.

Сначала у нас была мысль снабдить справочник «инструкцией для пользователей», которая помогала бы ориентироваться в материале. Однако в конце концов мы пришли к выводу, что принятая форма организации материала справочника достаточно проста и легко позволяет найти «ключ» к нему.

Количество недочетов различного рода обычно пропорционально объему печатного материала. Сознывая это, мы старались тщательно проверить весь материал. Не исключено, однако, что что-то выпало из нашего поля зрения. Мы будем чрезвычайно признательны тем читателям, которые укажут нам на недостатки и тем самым позволят исправить их при последующих изданиях.

*И. С. Григорьев  
Е. З. Мейлихов*

# ГЛАВА 1

## ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

А. Г. Чертов

### 1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Единицы физических величин, допущенные к применению на территории СССР, их наименования, определения и обозначения установлены государственными стандартами:

«ГСИ: Единицы физических величин» ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78);

ГОСТ 15484—81 «Излучения ионизирующие и их измерения: Термины и определения», а также руководящими нормативными документами:

РД 50—160—79 «Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин»;

РД 50—454—84 «Методические указания: Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81 «ГСИ: Единицы физических величин» в области ионизирующих излучений;

МИ 221—81 «Методика внедрения СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин» в области измерений давления, силы и теплофизических измерений».

В соответствии с перечисленными документами:

1. Подлежат обязательному применению единицы Международной системы единиц <sup>\*1</sup>, а также десятичные кратные и дольные от них.

2. Допускаются к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ внесистемные единицы, указанные в табл. 1.5, а также их сочетания с единицами СИ и нашедшие широкое применение на практике десятичные кратные и дольные от них.

3. Без ограничения срока допускается применять относительные и логарифмические единицы (табл. 1.6), за исключением единицы  $\text{не пер}$  (см. табл. 1.7), а также их сочетания с единицами СИ и нашедшие широкое применение на практике десятичные кратные и дольные от них.

4. Допускаются к применению временно внесистемные единицы, приведенные в табл. 1.7, до принятия по ним соответствующих международных решений.

5. Единицы, приведенные в табл. 1.8, изымаются из обращения в сроки, предусмотренные программами мероприятий, разработанными в соответствии с РД 50—160—79.

6. Стандарт «ГСИ. Единицы физических величин. ГОСТ. 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78)» не распространя-

ется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикациях их результатов, если в них не рассматривают и не используют результаты измерений конкретных физических величин, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам <sup>\*1</sup>.

### 1.2. ЕДИНИЦЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ

#### Основные величины и единицы СИ

**Длина  $l$**  — величина, характеризующая протяженность, удаленность и перемещение тел или их частей вдоль заданной линии;  $\dim l^* = L$ , единица — метр (m; м) <sup>\*3</sup>.

**Метр** есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени  $1/299\,792\,458$  с.

**Масса  $m$**  — величина, определяющая инертные и гравитационные свойства материальных объектов;  $\dim m = M$ , единица — килограмм (kg; кг).

**Килограмм** равен массе международного прототипа килограмма.

**Время  $t$**  — величина, характеризующая последовательную смену явлений и состояний материи, характеризующая длительность их бытия;  $\dim t = T$ , единица — секунда (s; с).

**Секунда** равна  $9\,192\,631\,770$  периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

**Сила электрического тока  $I$**  — скалярная величина, равная производной по времени от электрического заряда, переносимого носителями заряда сквозь рассматриваемую поверхность;  $\dim I = I$ , единица — ампер (A, А).

**Ампер** равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

**Термодинамическая температура  $T$**  — температура, отсчитываемая по термодинамической шкале температур

<sup>\*1</sup> Под условными шкалами понимаются, например, шкалы твердости Роквелла и Викерса, светочувствительности фотоматериалов.

<sup>\*2</sup>  $\dim$  — сокращение от английского слова dimension, что означает в переводе на русский язык «размерность».

<sup>\*3</sup> В скобках даются международное и русское обозначения единицы.

<sup>\*1</sup> Международная система единиц (международное сокращенное наименование SI, в русской транскрипции СИ) принята в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) и уточнена на последующих ГКМВ.



от абсолютного нуля;  $\dim T = \theta$ , единица — кельвин (К; К).

Кельвин равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.

Примечания:

1. Кроме температуры Кельвина (обозначение  $T$ ) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение  $t$ ), определяемую выражением  $t = T - T_0$ , где  $T_0 = 273,15$  К по определению. Температура Кельвина выражается в кельвинах, температура Цельсия — в градусах Цельсия (обозначение международное и русское  $^{\circ}\text{C}$ ). По размеру градус Цельсия равен кельвину ( $1^{\circ}\text{C} = 1$  К).

2. Интервал или разность температур Кельвина выражается в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.

3. Кроме термодинамической шкалы может быть использована Международная практическая температурная шкала МПТШ-68, которая была рекомендована XIV Генеральной конференцией по мерам и весам. МПТШ-68 базируется на 11 основных и 27 дополнительных реперных точках отсчета (см. гл. 8 «Термометрия») и выбрана таким образом, чтобы температура, измеренная по этой шкале, была близка к термодинамической температуре и разности между ними находились в пределах современной погрешности измерений.  $T_{68} = t_{68} + 273,15$  Индекс 68 может быть опущен, если это не приводит к недоразумениям.

**Количество вещества  $n$**  — величина, равная числу структурных элементов, содержащихся в теле (системе тел);  $\dim n = N$ , единица — моль (mol; моль).

**Моль** равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой  $0,012$  кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

**Сила света  $I$**  — величина, равная отношению светового потока, распространяющегося от источника излучения в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла к этому телесному углу;  $\dim I = J$ , единица — кандела (cd; кд).

**Кандела** <sup>\*1</sup> равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, сила излучения которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср.

Примечание. Единство световых измерений обеспечивается в соответствии с ГОСТ 8.023—74.

## Дополнительные единицы

**Плоский угол  $\alpha$**  — геометрическая фигура, образованная двумя лучами (сторонами угла), выходящими из одной точки. Размерности плоский угол не имеет, единица — радиан (rad; рад).

**Радиан** равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

**Телесный угол  $\Omega$**  — часть пространства, заключенного внутри одной полости конической поверхности с замкнутой направляющей. Размерности телесный угол не имеет, единица —стерадиан (sr; ср).

**Стерadian** равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

<sup>\*1</sup> Новое определение единицы силы света — канделы принято на XVI ГКМВ в октябре 1979 г. Оно позволяет воспродолжить канделу без создания черного тела, что соответственно дает возможность повысить точность ее воспроизведения.

## Производные единицы СИ по разделам физики

### ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

**Площадь  $S$**  — величина, характеризующая геометрические фигуры на плоскости и на искривленной поверхности и определяемая в простейших случаях числом заполняющих плоскую фигуру единичных квадратов, т. е. квадратов со стороной, равной единице длины;  $\dim S = L^2$ , единица — квадратный метр ( $\text{m}^2$ ;  $\text{м}^2$ ).

**Квадратный метр** равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны  $1$  м.

**Объем, вместимость  $V$**  — величина, характеризующая геометрические тела и определяемая в простейших случаях числом уместающихся в теле единичных кубов, т. е. кубов с ребром, равным в единице длины;  $\dim V = L^3$ , единица — кубический метр ( $\text{m}^3$ ,  $\text{м}^3$ ).

**Кубический метр** равен объему куба с ребрами, длины которых равны  $1$  м.

**Скорость  $v$**  — величина, равная первой производной от перемещения по времени:

$$v^*1 = dr/dt;$$

$\dim v = LT^{-1}$ , единица — метр в секунду ( $\text{m/s}$ ;  $\text{м/с}$ ).

**Метр в секунду** равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время  $1$  с перемещается на расстояние  $1$  м.

**Ускорение  $a$**  — величина, равная первой производной от скорости по времени:

$$a = dv/dt;$$

$\dim a = LT^{-2}$ , единица — метр на секунду в квадрате ( $\text{m/s}^2$ ;  $\text{м/с}^2$ ).

**Метр на секунду в квадрате** равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время  $1$  с скорость точки изменяется на  $1$  м/с.

**Угловая скорость  $\omega$**  — величина, равная первой производной от угла поворота по времени:

$$\omega = d\varphi/dt;$$

$\dim \omega = T^{-1}$ , единица — радиан в секунду ( $\text{rad/s}$ ;  $\text{рад/с}$ ).

**Радиан в секунду** равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за время  $1$  с поворачиваются относительно оси на угол  $1$  рад.

**Угловое ускорение  $\epsilon$**  — величина, определяемая первой производной от угловой скорости по времени:

$$\epsilon = d\omega/dt;$$

$\dim \epsilon = T^{-2}$ , единица — радиан на секунду в квадрате ( $\text{rad/s}^2$ ;  $\text{рад/с}^2$ ).

**Радиан на секунду в квадрате** равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором оно за время  $1$  с изменяет угловую скорость на  $1$  рад/с.

### ПЕРИОДИЧЕСКИЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ЯВЛЕНИЯ

**Фаза колебаний  $\varphi$**  — аргумент функции, описывающей величину, изменяющуюся по закону гармонических колебаний. Фаза колебаний не имеет размерности, единица — радиан (rad; рад).

<sup>\*1</sup> Здесь и далее обозначения векторных величин даются по их модулю, так как принадлежность величины к разряду векторных не имеет значения при определении ее размерности и единицы.

**Период  $T$**  — интервал времени, в течение которого совершается один цикл периодического процесса;  $\dim T = T$ , единица — секунда (с, с).

**Частота периодического процесса  $f$** ,  $\nu$  — величина обратная периоду;  $\dim \nu = T^{-1}$ , единица — герц (Гц, Гц).

**Герц** равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с совершается один цикл периодического процесса.

**Частота вращения  $n$**  — величина, равная числу оборотов, совершаемых за время 1 с;  $\dim n = T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени ( $s^{-1}$ ;  $c^{-1}$ ).

**Секунда в минус первой степени** равна частоте равномерного вращения, при которой за время 1 с тело совершает один полный оборот.

**Волновое число  $\nu$**  — величина, обратная длине волны  $\lambda$ :

$$\nu = 1/\lambda;$$

$\dim \nu = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $m^{-1}$ ;  $m^{-1}$ ).

**Метр в минус первой степени** равен волновому числу колебаний с длиной волны 1 м.

**Коэффициент затухания  $\delta$**  — величина, обратная интервалу  $\tau$ , в течение которого амплитуда  $A$  уменьшается в  $e$  раз;  $\dim \delta = T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени ( $s^{-1}$ ;  $c^{-1}$ ).

**Секунда в минус первой степени** равна коэффициенту затухания, при котором за время 1 с амплитуда уменьшается в  $e$  раз, где  $e$  — основание натурального логарифма.

**Коэффициент ослабления  $\mu$**  — величина, характеризующая свойства вещества и равная отношению относительного уменьшения интенсивности  $dI/I$  излучений к длине пути  $dx$ , пройденного излучением в данном веществе:

$$\mu = \frac{dI/I}{dx};$$

$\dim \mu = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $m^{-1}$ ;  $m^{-1}$ ).

**Метр в минус первой степени** равен коэффициенту ослабления, при котором на расстоянии в 1 м амплитуда уменьшается в  $e$  раз, где  $e$  — основание натурального логарифма.

## МЕХАНИКА

**Плотность  $\rho$**  — величина, равная отношению массы  $dm$  элемента тела к объему  $dV$  этого элемента:

$$\rho = dm/dV;$$

$\dim \rho = ML^{-3}$ , единица — килограмм на кубический метр ( $kg/m^3$ ;  $kg/m^3$ ).

**Килограмм на кубический метр** равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1  $m^3$  равна 1 кг.

**Удельный объем  $v$**  — величина, равная отношению объема  $dV$  элемента тела к массе  $dm$  этого элемента:

$$v = dV/dm;$$

$\dim v = L^3M^{-1}$ , единица — кубический метр на килограмм ( $m^3/kg$ ;  $m^3/kg$ ).

**Кубический метр на килограмм** равен удельному объему однородного вещества, объем которого при массе 1 кг равен 1  $m^3$ .

**Импульс (количество движения)  $p$**  материальной точки — величина, равная произведению массы  $m$  ма-

териальной точки на ее скорость  $v$ :

$$p = mv;$$

$\dim p = LMT^{-1}$ , единица — килограмм-метр в секунду ( $kg \cdot m/s$ ;  $kg \cdot m/c$ ).

**Килограмм-метр в секунду** равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

**Момент импульса (момент количества движения)  $L$**  точки, вращающейся вокруг неподвижной оси, — величина, равная произведению импульса точки на расстояние ее до оси вращения:

$$L = mvr;$$

$\dim L = L^2MT^{-1}$ , единица — килограмм-метр в квадрате на секунду ( $kg \cdot m^2/s$ ;  $kg \cdot m^2/c$ ).

**Килограмм-метр в квадрате на секунду** равен моменту импульса материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей импульс 1 кг·м/с.

**Момент инерции (динамический момент инерции)  $J$**  материальной точки относительно некоторой оси — величина, равная произведению массы  $m$  материальной точки на квадрат расстояния  $r$  ее до оси вращения:

$$J = mr^2;$$

$\dim J = L^2M$ , единица — килограмм-метр в квадрате ( $kg \cdot m^2$ ;  $kg \cdot m^2$ ).

**Килограмм-метр в квадрате** равен моменту инерции материальной точки массой 1 кг, находящейся на расстоянии 1 м от оси вращения.

**Сила  $F$**  — векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел. Определяется по второму закону Ньютона:

$$F = ma;$$

$\dim F = LMT^{-2}$ , единица — ньютон (Н; Н).

**Ньютон** равен силе, придающей телу массой 1 кг ускорение 1 м/с<sup>2</sup> в направлении действия силы.

**Момент силы  $M$**  относительно некоторой точки — величина, равная произведению силы  $F$  на плечо  $h$ , т. е. на расстояние между направлением силы и этой точкой:

$$M = Fh;$$

$\dim M = L^2MT^{-2}$ , единица — ньютон-метр (Н·м; Н·м).

**Ньютон-метр** равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы.

**Импульс силы  $I$**  — величина, равная произведению силы  $F$  на интервал времени, в течение которого сила действовала:

$$dI = Fdt;$$

$\dim I = LMT^{-1}$ , единица — ньютон-секунда (Н·с; Н·с).

**Ньютон-секунда** равна импульсу силы, равной 1 Н и действующей в течение 1 с.

**Давление  $p$**  — величина, равная отношению силы  $dF$ , действующей на элемент поверхности нормально к ней, к площади  $dS$  этого элемента:

$$p = dF/dS;$$

$\dim p = L^{-1}MT^{-2}$ , единица — паскаль (Па; Па).

**Паскаль** равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1  $m^2$ .

**Примечание.** В паскалях выражаются также нормальное и касательное напряжения, а также модули продольной упругости, сдвига и объемного сжатия.

Динамическая вязкость  $\eta$  является коэффициентом пропорциональности в формуле силы внутреннего трения:

$$F = \eta \frac{dv}{dl} \Delta S,$$

где  $dv/dl$  — градиент скорости;  $\Delta S$  — площадь поверхности слоя, на которую рассчитывается сила внутреннего трения;  $\dim \eta = L^{-1}MT^{-1}$ , единица — паскаль-секунда (Па·с; Па·с).

Паскаль-секунда равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости 1 м/с, равно 1 Па.

Кинематическая вязкость  $\nu$  — величина, равная отношению динамической вязкости среды к ее плотности:

$$\nu = \eta/\rho;$$

$\dim \nu = L^2T^{-1}$ , единица — квадратный метр на секунду ( $m^2/s$ ;  $m^2/c$ ).

Квадратный метр на секунду равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1 Па·с и плотностью 1  $kg/m^3$ .

Поверхностное натяжение  $\alpha$  жидкости — величина, равная отношению силы  $dF$ , действующей на участок контура свободной поверхности нормально к контуру и по касательной к поверхности, к длине  $dl$  этого участка:

$$\alpha = dF/dl;$$

$\dim \alpha = MT^{-2}$ , единица — ньютон на метр (Н/м; Н/м).

Ньютон на метр равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, действующей на участок контура свободной поверхности длиной 1 м нормально к контуру и по касательной к поверхности.

Работа. Элементарной работой  $dA$  называют величину, равную скалярному произведению силы  $F$  на элементарное перемещение  $ds$ :

$$dA = Fds = Fds \cos \alpha;$$

$\dim A = L^2MT^{-2}$ , единица — джоуль (Дж; Дж).

Джоуль равен работе силы 1 Н, перемещающей тело на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Примечание. В джоулях выражаются также все виды энергии.

Мощность  $N$ ,  $P$  — величина, равная отношению работы  $dA$  к бесконечно малому интервалу времени  $dt$ , в течение которого эта работа совершается:

$$N = dA/dt;$$

$\dim N = L^2MT^{-3}$ , единица — ватт (Вт; Вт).

Ватт равен мощности, при которой работа в 1 Дж производится за время 1 с.

#### ТЕПЛОТА

Температурный коэффициент  $\alpha$  — величина, равная отношению относительного изменения  $dX/X_0$  физической величины к изменению  $dT$  температуры от принятой за начальную:

$$\alpha = dX/(X_0dT),$$

где  $X_0$  — значение физической величины при температуре, принятой за начальную;  $\dim \alpha = \theta^{-1}$ , единица — кельвин в минус первой степени ( $K^{-1}$ ;  $K^{-1}$ );

Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту относительного изменения физической величины, при котором изменение температуры на 1 К от принятой за начальную вызывает относительное изменение этой величины, равное единице.

Температурный градиент  $\text{grad } T$  — векторная величина, численно равная изменению температуры на едини-

це длины и направленная в сторону наиболее быстрого изменения температуры температурного поля;  $\dim \text{grad } T = L^{-1} \theta$ , единица — кельвин на метр ( $K/m$ ;  $K/m$ ).

Кельвин на метр равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К.

Внутренняя энергия  $U$  системы — энергия хаотического теплового движения всех микрочастиц системы (молекул, атомов, ионов и т. п.) и энергия взаимодействия этих частиц.

Внутренняя энергия, как и любая другая энергии, имеет размерность работы:  $\dim U = L^2MT^{-2}$  и выражается в джоулях (Дж; Дж).

Теплота, количество теплоты  $Q$  — часть внутренней энергии, которая самопроизвольно, без внешнего воздействия переходит от тел более нагретых к телам менее нагретым посредством теплопроводности или лучеиспускания;  $\dim Q = L^2MT^{-2}$ , единица — джоуль (Дж; Дж).

Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж.

Примечание. В джоулях также выражаются термодинамический потенциал (энтальпия, изохорно-изотермический потенциал, изобарно-изотермический потенциал), теплота фазового превращения, теплота химической реакции.

Тепловой поток  $\Phi$  через некоторую поверхность — величина, равная отношению количества теплоты  $dQ$ , прошедшей через эту поверхность, ко времени  $dt$ , за которое прошло это количество теплоты:

$$\Phi = dQ/dt.$$

Размерность теплового потока равна размерности мощности:  $\dim \Phi = L^2MT^{-3}$ , единица — ватт (Вт; Вт).

Ватт равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Поверхностная плотность теплового потока  $q$  — величина, равная отношению теплового потока  $d\Phi$  к площади  $dS$  поверхности, через которую проходит этот поток:

$$q = d\Phi/dS;$$

$\dim q = MT^{-3}$ , единица — ватт на квадратный метр ( $W/m^2$ ;  $Вт/м^2$ ).

Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности теплового потока, при которой тепловой поток 1 Вт равномерно распределен по поверхности площадью 1  $m^2$ .

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  — величина, равная плотности теплового потока, обусловленного теплопроводностью при градиенте температуры, равном единице. Входит в качестве коэффициента в формулу, определяющую количество теплоты, перенесенное за время  $t$  через поверхность площадью  $S$  в направлении нормали к этой поверхности:

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} St,$$

где  $dT/dx$  — градиент температуры;  $\dim \lambda = LMT^{-3} \theta^{-1}$ , единица — ватт на метр-кельвин ( $W/(m \cdot K)$ ;  $Вт/(м \cdot К)$ ).

Ватт на метр-кельвин равен коэффициенту теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока 1  $Вт/м^2$  устанавливается температурный градиент 1  $K/m$ .

Теплоемкость  $C$  тела (системы) — величина, равная отношению количества теплоты  $dQ$ , необходимой для нагревания тела (системы тел), к разности температур  $dT$  тела:

$$C = dQ/dT;$$

$\dim C = L^2MT^{-2}\theta^{-1}$ , единица — джоуль на кельвин (Дж/К; Дж/К).

**Джоуль на кельвин** равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при подведении к системе количества теплоты 1 Дж

**Удельная теплоемкость**  $c$  вещества — величина, равная отношению теплоемкости  $C$  однородного тела (системы) к его массе:

$$c = C/m;$$

$\dim c = L^2 T^{-2} \theta^{-1}$ , единица — джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg·K); Дж/(кг·К)).

**Джоуль на килограмм-кельвин** равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К.

**Температуропроводность**  $a$  — величина, характеризующая скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности и равная отношению коэффициента теплопроводности  $\lambda$  к объемной теплоемкости  $c_p \rho$  вещества:

$$a = \lambda / (c_p \rho),$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость вещества при постоянном давлении;  $\rho$  — плотность вещества;  $\dim a = L^2 T^{-1}$ , единица — квадратный метр на секунду (м<sup>2</sup>/с; м<sup>2</sup>/с).

**Квадратный метр на секунду** равен температуропроводности вещества с коэффициентом теплопроводности 1 Вт/(м·К), удельной теплоемкостью при постоянном давлении 1 Дж/(кг·К) и плотностью 1 кг/м<sup>3</sup>.

**Удельная газовая постоянная**  $B$  — величина, равная отношению работы  $dA$ , совершаемой идеальным газом при изобарном нагревании, к массе газа  $m$  и интервалу температур  $dT$ , на который газ нагревается:

$$B = dA / (mdT);$$

$\dim B = L^2 T^{-2} \theta^{-1}$ , единица — джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg·K); Дж/(кг·К)).

**Джоуль на килограмм-кельвин** равен удельной газовой постоянной идеального газа массой 1 кг, совершающего при повышении температуры на 1 К при постоянном давлении работу 1 Дж.

**Энтропия**  $S$  системы — однозначная функция состояния системы, определяемая соотношением

$$dS = dQ/T,$$

где  $dQ$  — бесконечно малое количество теплоты, сообщенной системе при температуре  $T$ ;  $\dim Q = L^2 M T^{-2} \theta^{-1}$ , единица — джоуль на кельвин (J/K; Дж/К).

**Джоуль на кельвин** равен изменению энтропии системы, которой при температуре  $nK$  в изотермическом процессе сообщается количество теплоты  $n$  Дж.

**Удельная энтропия**  $s$  — величина, равная отношению энтропии  $dS$  к массе  $dm$  системы:

$$s = dS/dm;$$

$\dim s = L^2 T^{-2} \theta^{-1}$ , единица — джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg·K); Дж/(кг·К)).

**Джоуль на килограмм-кельвин** равен удельной энтропии вещества, в котором при массе 1 кг изменение энтропии составляет 1 Дж/К.

**Удельное количество теплоты**  $q$  — величина, равная отношению количества теплоты  $dQ$ , подводимого к системе или отводимого от нее в ходе процесса, к массе  $dm$  системы:

$$q = dQ/dm;$$

$\dim q = L^2 T^{-2}$ , единица — джоуль на килограмм (J/kg; Дж/кг).

**Джоуль на килограмм** равен удельному количеству теплоты процесса, в ходе которого к веществу массой 1 кг подводится (или отводится от него) количество теплоты 1 Дж.

**Примечание.** В джоулях на килограмм выражаются также удельный термодинамический потенциал, удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции.

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ<sup>\*1</sup>

**Количество электричества** (электрический заряд)  $Q$  — величина, равная произведению силы тока  $I$  на время  $t$ , в течение которого шел ток:

$$Q = It;$$

$\dim Q = TI$ , единица — кулон (C; Кл).

**Кулон** равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой 1 А за время 1 с.

**Пространственная плотность электрического заряда**  $\rho$  — величина, равная отношению заряда  $dQ$ , находящегося в элементе пространства, к объему  $dV$  этого элемента:

$$\rho = dQ/dV;$$

$\dim \rho = L^{-3} TI$ , единица — кулон на кубический метр (C/м<sup>3</sup>; Кл/м<sup>3</sup>).

**Кулон на кубический метр** равен пространственной плотности электрического заряда, при которой в объеме 1 м<sup>3</sup> равномерно распределен заряд 1 Кл.

**Поверхностная плотность электрического заряда**  $\sigma$  — величина, равная отношению заряда  $dQ$ , находящегося на элементе поверхности, к площади  $dS$  этого элемента:

$$\sigma = dQ/dS;$$

$\dim \sigma = L^{-2} TI$ , единица — кулон на квадратный метр (C/м<sup>2</sup>; Кл/м<sup>2</sup>).

**Кулон на квадратный метр** равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>, равен 1 Кл.

**Линейная плотность электрического заряда**  $\tau$  — величина, равная отношению заряда  $dQ$ , находящегося на элементе линии, к длине  $dl$  этого элемента:

$$\tau = dQ/dl;$$

$\dim \tau = L^{-1} TI$ , единица — кулон на метр (C/м; Кл/м).

**Кулон на метр** равен линейной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по линии длиной 1 м, равен 1 Кл.

**Электрическое напряжение**  $U$  — величина, равная отношению мощности  $P$  постоянного тока к силе тока  $I$ :

$$U = P/I;$$

$\dim U = L^2 M T^{-3} I^{-1}$ , единица — вольт (V; В).

**Вольт** равен электрическому напряжению, вызывающему в электрической цепи постоянный ток силой 1 А при мощности 1 Вт.

**Примечание.** В вольтах выражаются также электрический потенциал и разность потенциалов электрического поля, электродвижущая сила.

**Напряженность электрического поля**  $E$  — векторная величина, равная отношению силы  $dF$ , действующей на положительный заряд  $dQ$ , помещенный в некоторую точку электрического поля, к этому заряду:

$$E = dF/dQ;$$

$\dim E = L M T^{-3} i^{-1}$ , единица — вольт на метр (V/м; В/м).

<sup>\*1</sup> Электрические и магнитные единицы СИ следует образовывать в соответствии с рационализованной формой уравнений электромагнитного поля.

**Вольт на метр** равен напряженности однородного электрического поля, создаваемой разностью потенциалов 1 В между точками, находящимися на расстоянии 1 м на линии напряженности поля.

**Поток электрического смещения**  $\Psi$  сквозь замкнутую поверхность — величина, равная алгебраической сумме электрических зарядов, содержащихся во внутреннем пространстве этой поверхности:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n Q_i;$$

$\dim \Psi = \text{ТИ}$ , единица — кулон (С; Кл).

**Кулон** равен потоку электрического смещения, связанному с суммарным свободным зарядом 1 Кл.

**Электрическое смещение**  $D$  — величина, равная отношению потока электрического смещения  $d\Psi$  к площади  $dS$  элемента поверхности, через которую этот поток проходит:

$$D = d\Psi/dS;$$

$\dim D = \text{Л}^{-2}\text{ТИ}$ , единица — кулон на квадратный метр ( $\text{С}/\text{м}^2$ ;  $\text{Кл}/\text{м}^2$ ).

**Кулон на квадратный метр** равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью 1  $\text{м}^2$  равен 1 Кл.

**Абсолютная диэлектрическая проницаемость**  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon^*1$  среды является коэффициентом пропорциональности в формуле, связывающей между собой смещение и напряженность электрического поля:

$$D = \epsilon_a E;$$

$\dim \epsilon_a = \text{Л}^{-3}\text{М}^{-1}\text{Т}^4\text{И}^2$ , единица — фарад на метр ( $\text{Ф}/\text{м}$ ).

**Фарад на метр** равен абсолютной диэлектрической проницаемости среды, в которой напряженность электрического поля 1 В/м создает электрическое смещение 1 Кл/м<sup>2</sup>.

**Примечание.** В фарадах на метр выражается также электрическая постоянная  $\epsilon_0$ .

**Электрический момент диполя**  $p$  — векторная величина, равная произведению заряда  $Q$  диполя на его плечо  $l$ :

$$p = Ql;$$

$\dim p = \text{ЛТИ}$ , единица — кулон-метр (С·м; Кл·м).

**Кулон-метр** равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого.

**Плотность электрического тока**  $j$  — величина, равная отношению силы тока  $dI$  к площади  $dS$  поперечного сечения:

$$j = dI/dS;$$

$\dim j = \text{Л}^{-2}\text{И}$ , единица — ампер на квадратный метр ( $\text{А}/\text{м}^2$ ;  $\text{А}/\text{м}^2$ ).

**Ампер на квадратный метр** равен плотности равномерно распределенного по поперечному сечению площадью 1  $\text{м}^2$  электрического тока силой 1 А.

**Линейная плотность электрического тока**  $A$  — величина, равная отношению силы тока  $dI$  в тонком листовом проводнике к ширине  $da$  этого проводника:

$$A = dI/da;$$

$\dim A = \text{Л}^{-1}\text{И}$ , единица — ампер на метр ( $\text{А}/\text{м}$ ;  $\text{А}/\text{м}$ ).

\*1 Запасное обозначение ( $\epsilon$ ) обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу.

**Ампер на метр** равен линейной плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по сечению тонкого листового проводника шириной 1 м, равна 1 А.

**Электрическое сопротивление**  $R$  — величина, характеризующая проводник и являющаяся коэффициентом пропорциональности в формуле, связывающей между собой напряжение  $U$  и силу тока  $I$ :

$$U = RI;$$

$\dim R = \text{Л}^2\text{МТ}^{-3}\text{И}^{-2}$ , единица — Ом ( $\Omega$ ; Ом).

**Ом** равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение 1 В при силе тока 1 А.

**Электрическая проводимость**  $G$  — величина, обратная сопротивлению:

$$G = 1/R;$$

$\dim G = \text{Л}^{-2}\text{М}^{-1}\text{Т}^3\text{И}^2$ , единица — сименс (S; См).

**Сименс** равен электрической проводимости проводника сопротивлением 1 Ом.

**Удельное электрическое сопротивление**  $\rho$  вещества — величина, численно равная сопротивлению проводника длиной, равной единице длины, и площадью поперечного сечения, равной единице площади;  $\dim \rho = \text{Л}^3\text{МТ}^{-3}\text{И}^{-2}$ , единица — ом-метр ( $\Omega \cdot \text{м}$ ; Ом·м).

**Ом-метр** равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1  $\text{м}^2$  и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом.

**Удельная электрическая проводимость**  $g$  вещества — величина, обратная удельному электрическому сопротивлению:

$$g = 1/\rho;$$

$\dim g = \text{Л}^{-3}\text{М}^{-1}\text{Т}^3\text{И}^2$ , единица — сименс на метр ( $\text{С}/\text{м}$ ; См/м).

**Сименс на метр** равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения 1  $\text{м}^2$  и длине 1 м имеет электрическую проводимость, равную 1 См.

**Напряженность магнитного поля**  $H$  — величина, характеризующая магнитное поле. Размерность и единица ее могут быть определены по формуле напряженности поля в центре длинного соленоида:

$$H = nI;$$

$\dim H = \text{Л}^{-1}\text{И}$ , единица — ампер на метр ( $\text{А}/\text{м}$ ; А/м).

**Ампер на метр** равен напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида с равномерно распределенной обмоткой, по которой проходит ток силой 1/н А, где  $n$  — число витков на участке соленоида длиной 1 м.

**Магнитодвижущая сила**  $F_m$  — величина, характеризующая намагничивающее действие электрического тока и равная циркуляции напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура:

$$F_m = \oint H_l dl;$$

$\dim F_m = \text{И}$ , единица — ампер (А; А).

**Ампер** равен магнитодвижущей силе вдоль замкнутого контура, сцепленного с контуром постоянного тока силой 1 А.

**Примечание.** В амперах выражается также разность магнитных потенциалов.

**Магнитный поток.** Единица и размерность магнитного потока  $\Phi$  определяются по формуле

$$Q = \Phi/R,$$

где  $Q$  — количество электричества, проходящего в замк-

нотом контуре при изменении до нуля магнитного потока  $\Phi$ , сцепленного с этим контуром. Из этой формулы следует:  $\dim \Phi = L^2 M T^{-2} I^{-1}$ , единица — вебер (Wб; Вб).

*Вебер* равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проходит количество электричества 1 Кл.

**Магнитная индукция**  $B$  — величина, равная отношению магнитного потока  $d\Phi$  к площади  $dS$  сечения, через которое проходит этот поток:

$$B = d\Phi/dS;$$

$\dim B = M T^{-2} I^{-1}$ , единица — тесла (Т; Тл).

*Тесла* равна магнитной индукции, при которой через поперечное сечение площадью 1 м<sup>2</sup> проходит магнитный поток 1 Вб.

**Индуктивность**  $L$  — величина, характеризующая замкнутый контур и являющаяся коэффициентом пропорциональности между магнитным потоком, сцепленным с этим контуром, и силой тока в нем:

$$\Phi = LI;$$

$\dim L = L^2 M T^{-2} I^{-2}$ , единица — генри (Н; Гн).

*Генри* равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.

*Примечание.* В генри выражается также взаимная индуктивность.

**Абсолютная магнитная проницаемость**  $\mu_a$ ,  $\mu^*$  является коэффициентом пропорциональности между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля:

$$B = \mu_a H;$$

$\dim \mu_a = L M T^{-2} I^2$ , единица — генри на метр (Н/м; Гн/м).

*Генри на метр* равен абсолютной магнитной проницаемости среды, в которой напряженность магнитного поля 1 А/м создает магнитную индукцию 1 Тл.

*Примечание.* В генри на метр выражается также магнитная постоянная  $\mu_0$ .

**Магнитный момент** (амперовский)  $p_m$  контура с током — величина равная произведению силы тока  $I$  в контуре на площадь  $S$ , ограниченную им:

$$p_m = IS;$$

$\dim p_m = L^2 I$ , единица — ампер-квадратный метр (А·м<sup>2</sup>; А·м<sup>2</sup>).

*Ампер-квадратный метр* равен магнитному моменту электрического тока силой 1 А, проходящего по контуру площадью 1 м<sup>2</sup>.

*Примечание.* Размерность магнитного момента (кулоновского)  $\dim p_m = L^3 M T^{-2} I^{-1}$ , единица — вебер-метр (Wб·м; Вб·м).

**Намагниченность** (интенсивность намагничивания)  $M$  — величина, равная отношению суммы магнитных моментов всех магнитных диполей, входящих в элемент магнетика, к объему  $dV$  этого элемента:

$$M = \sum_{i=1}^N p_{m,i} / dV,$$

где  $p_{m,i}$  — магнитный момент  $i$ -го диполя;  $N$  — число диполей, входящих в элемент магнетика;  $\dim M = L^{-1} I$ , единица — ампер на метр (А/м; А/м).

*Ампер на метр* равен намагниченности, при которой

вещество объемом 1 м<sup>3</sup> имеет магнитный момент 1 А·м<sup>2</sup>.

**Магнитное сопротивление**  $R_m$  — величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности в формуле, выражающей зависимость магнитного потока  $\Phi$  от магнитодвижущей силы  $F_m$ :

$$F_m = R_m \Phi;$$

$\dim R_m = L^{-2} M^{-1} T^2 I^2$ , единица — генри в минус первой степени (Н<sup>-1</sup>; Гн<sup>-1</sup>).

*Генри в минус первой степени* равен магнитному сопротивлению магнитной цепи, в которой магнитодвижущая сила 1 А создает магнитный поток 1 Вб.

**Магнитная проводимость**  $\Lambda$  — величина, обратная магнитному сопротивлению:

$$\Lambda = 1/R_m;$$

$\dim \Lambda = L^2 M T^{-2} I^{-2}$ , единица — генри (Н; Гн).

*Генри* равен магнитной проводимости магнитной цепи с магнитным сопротивлением 1 Гн<sup>-1</sup>.

## ОПТИКА

**Энергетическая экспозиция**  $H_e$  — величина, равная отношению энергии  $dW$  излучения, падающего на поверхность к площади  $dS$  этой поверхности:

$$H_e = dW/dS;$$

$\dim H_e = M T^{-2}$ , единица — джоуль на квадратный метр (Дж/м<sup>2</sup>; Дж/м<sup>2</sup>).

*Джоуль на квадратный метр* равен энергетической экспозиции, при которой на поверхность площадью 1 м<sup>2</sup> падает излучение с энергией 1 Дж.

**Поток излучения**  $\Phi_e$  — величина, равная отношению энергии излучения  $\Delta W$ , переносимой излучением, к времени  $\Delta t$  переноса, значительно превышающему период колебаний, т. е.

$$\Phi_e = \Delta W / \Delta t;$$

$\dim \Phi_e = L^2 M T^{-3}$ , т. е. совпадает с размерностью мощности, единица — ватт (Вт; Вт).

*Ватт* равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

**Энергетическая светимость** (излучательность)  $M_e$  — величина, равная отношению потока излучения  $d\Phi_e$  к площади  $dS$ , с которой это излучение испускается:

$$M_e = d\Phi_e / dS;$$

$\dim M_e = M T^{-3}$ , единица — ватт на квадратный метр (Вт/м<sup>2</sup>; Вт/м<sup>2</sup>).

*Ватт на квадратный метр* равен энергетической светимости, при которой поверхность площадью 1 м<sup>2</sup> излучает поток излучения 1 Вт.

**Облученность**  $E_e$  — величина, равная отношению потока излучения  $d\Phi_e$  к площади  $dS$ , которой это излучение поглощается:

$$E_e = d\Phi_e / dS;$$

$\dim E_e = M T^{-3}$ , единица — ватт на квадратный метр (Вт/м<sup>2</sup>; Вт/м<sup>2</sup>).

*Ватт на квадратный метр* равен облученности, при которой поверхность площадью 1 м<sup>2</sup> поглощает поток излучения 1 Вт.

**Сила излучения**  $I_e$  — величина, равная отношению потока излучения  $d\Phi_e$  источника к телесному углу  $d\Omega$ , в пределах которого распространяется это излучение:

$$I_e = d\Phi_e / d\Omega;$$

$\dim I_e = L^2 M T^{-3}$ , единица — ватт на стерадиан (Вт/ср; Вт/ср).

\*1 Запасное обозначение ( $\mu$ ) обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу.

**Ватт на стерадиан** равен силе излучения света точечного источника, излучающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт.

**Энергетическая яркость**  $B_e$  — величина, равная отношению энергетической силы света  $dI_e$  элемента излучающей поверхности к площади  $dS$  проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:

$$B_e = dI_e / dS;$$

$\dim B_e = \text{MT}^{-3}$ , единица — ватт на стерадиан-квадратный метр ( $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ ; ( $\text{Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$ )).

**Ватт на стерадиан-квадратный метр** равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности площадью 1  $\text{м}^2$  в перпендикулярном к ней направлении при энергетической силе света 1  $\text{Вт}/\text{ср}$ .

**Световой поток**  $\Phi_v$ , испускаемый источником света в некоторый телесный угол, — величина, равная произведению силы света  $I$  источника на этот телесный угол  $\Omega$ ;

$$\Phi_v = I\Omega;$$

$\dim \Phi_v = I$ , единица — люмен ( $\text{lm}$ ,  $\text{лм}$ ).

**Люмен** равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.

**Световая энергия**  $Q$  — величина, равная произведению светового потока  $\Phi_v$  на время  $t$ , в течение которого излучается (или воспринимается) этот световой поток:

$$Q = \Phi_v t;$$

$\dim Q = \text{TJ}$ , единица — люмен-секунда ( $\text{lm} \cdot \text{с}$ ;  $\text{лм} \cdot \text{с}$ ).

**Люмен-секунда** равна световой энергии светового потока в 1 лм, действующего в течение 1 с.

**Яркость**  $B_\varphi$  светящейся поверхности в некотором направлении  $\varphi$  — величина, равная отношению силы света  $I$  в этом направлении к площади  $S$  проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению:

$$B_\varphi = I / (S \cos \varphi);$$

$\dim B = \text{L}^{-2}\text{J}$ , единица — кандела на квадратный метр ( $\text{kd}/\text{м}^2$ ;  $\text{кд}/\text{м}^2$ ).

**Кандела на квадратный метр** равна яркости светящейся поверхности площадью 1  $\text{м}^2$  при силе света 1 кд.

**Светимость**  $R$  — величина, равная отношению светового потока  $d\Phi_v$ , испускаемого светящейся поверхностью, к ее площади  $dS$ :

$$R = d\Phi_v / dS;$$

$\dim R = \text{L}^{-2}\text{J}$ , единица — люмен на квадратный метр ( $\text{lm}/\text{м}^2$ ;  $\text{лм}/\text{м}^2$ ).

**Люмен на квадратный метр** равен светимости поверхности площадью 1  $\text{м}^2$ , испускающей световой поток 1 лм.

**Освещенность**  $E$  — величина, равная отношению светового потока  $d\Phi_v$ , падающего на элемент поверхности, к площади  $dS$  этого элемента:

$$E = d\Phi_v / dS;$$

$\dim E = \text{L}^{-2}\text{J}$ , единица — люкс ( $\text{lx}$ ;  $\text{лк}$ ).

**Люкс** равен освещенности поверхности площадью 1  $\text{м}^2$  при падающем на нее световом потоке 1 лм.

**Световая экспозиция**  $H$  — величина, равная произведению освещенности  $E$  на время  $t$ , в течение которого происходит облучение:

$$H = Et;$$

$\dim H = \text{L}^{-2}\text{TJ}$ , единица — люкс-секунда ( $\text{lx} \cdot \text{с}$ ;  $\text{лк} \cdot \text{с}$ ).

**Люкс-секунда** равна световой экспозиции, создаваемой за время 1 с при освещенности 1 лк.

## АКУСТИКА

**Звуковое давление**  $p$  — давление, дополнительно возникающее в газообразной или жидкой среде при прохождении через нее звуковых волн. Звуковое давление, как и любое другое давление, имеет размерность  $\dim p = \text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$  и выражается в паскалях ( $\text{Па}$ ;  $\text{Па}$ ).

**Колебательная скорость**  $v$  — величина, равная произведению амплитуды  $A$  колебаний частиц среды, через которую проходит звук, на угловую частоту  $\omega$ :

$$v = A\omega;$$

$\dim v = \text{LT}^{-1}$ , единица — метр в секунду ( $\text{м}/\text{с}$ ;  $\text{м}/\text{с}$ ).

**Объемная скорость звука**  $q$  — величина, равная произведению колебательной скорости  $v$  на площадь  $S$  поперечного сечения канала, в котором распространяется звук:

$$q = vS;$$

$\dim q = \text{L}^3\text{T}^{-1}$ , единица — кубический метр в секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\text{м}^3/\text{с}$ ).

**Кубический метр в секунду** равен объемной скорости звука при колебательной скорости 1  $\text{м}/\text{с}$  и площади поперечного сечения канала 1  $\text{м}^2$ .

**Звуковая энергия**  $W$  — энергия частиц среды, в которой распространяется звук. Звуковая энергия, как и любая другая энергия, имеет размерность  $\dim W = \text{L}^2\text{MT}^{-2}$  и выражается в джоулях ( $\text{J}$ ;  $\text{Дж}$ ).

**Плотность звуковой энергии** — величина, равная отношению звуковой энергии  $dW$ , содержащейся в элементе канала, к объему  $dV$  этого элемента:

$$w = dW / dV;$$

$\dim w = \text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ , единица — джоуль на кубический метр ( $\text{J}/\text{м}^3$ ;  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ).

**Джоуль на кубический метр** равен плотности звуковой энергии в канале объемом 1  $\text{м}^3$  при звуковой энергии 1  $\text{Дж}$ .

**Поток звуковой энергии** (звуковая мощность)  $P$  — величина, равная отношению звуковой энергии  $dW$ , проходящей через поверхность, к интервалу времени  $dt$ , за который эта энергия проходит:

$$P = dW / dt;$$

$\dim P = \text{L}^2\text{MT}^{-3}$ , единица — ватт ( $\text{W}$ ;  $\text{Вт}$ ).

**Интенсивность звука**  $I$  — величина, равная отношению потока  $dP$  звуковой энергии через поверхность, перпендикулярную направлению распространения звука, к площади  $dS$  этой поверхности:

$$I = dP / dS;$$

$\dim I = \text{MT}^{-3}$ , единица — ватт на квадратный метр ( $\text{W}/\text{м}^2$ ;  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

**Ватт на квадратный метр** равен интенсивности звука в канале при потоке звуковой энергии 1  $\text{Вт}$  и площади поперечного сечения 1  $\text{м}^2$ .

**Акустическое сопротивление**  $Z_a$  канала является коэффициентом пропорциональности в равенстве, связывающем между собой амплитуду  $p_0$  звукового давления и объемную скорость  $q$  звука:

$$p_0 = Z_a q;$$

$\dim Z_a = \text{L}^{-4}\text{MT}^{-1}$ , единица — паскаль секунда на кубический метр ( $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ ;  $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ ).

**Паскаль-секунда на кубический метр** равна акустическому сопротивлению канала, в котором создается объемная скорость 1  $\text{м}^3/\text{с}$  при звуковом давлении 1  $\text{Па}$ .

**Удельное акустическое сопротивление**  $Z_s$  — величина, равная произведению акустического сопротивления на площадь  $S$  поперечного сечения канала:

$$Z_s = Z_a S;$$

$\dim Z_s = \text{Л}^{-2} \text{МТ}^{-1}$ , единица — паскаль-секунда на метр ( $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$ ;  $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$ ).

**Паскаль-секунда на метр** равна удельному акустическому сопротивлению канала площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ , имеющего акустическое сопротивление  $1 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

**Механическое сопротивление**  $Z_m$  — величина, равная отношению силы  $F$ , действующей на поперечное сечение канала, в котором распространяется звук, к средней колебательной скорости  $\langle v \rangle$  в этом сечении:

$$Z_m = F / \langle v \rangle;$$

$\dim Z_m = \text{МТ}^{-1}$ , единица — ньютон-секунда на метр ( $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}$ ;  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}$ ).

**Ньютон-секунда на метр** равна механическому сопротивлению канала, в котором при силе  $1 \text{ Н}$  возникает колебательная скорость  $1 \text{ м}/\text{с}$ .

## ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**Молярная масса**  $M$  — величина, равная отношению массы  $m$  системы (тела) к количеству вещества  $n$  системы:

$$M = m/n;$$

$\dim M = \text{МН}^{-1}$ , единица — килограмм на моль ( $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $\text{кг}/\text{моль}$ ).

**Килограмм на моль** равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества  $1 \text{ моль}$  массу  $1 \text{ кг}$ .

**Молярный объем**  $V_m$  — величина, равная отношению объема  $V$  системы (тела) к ее количеству вещества  $n$ :

$$V_m = V/n;$$

$\dim V_m = \text{Л}^3 \text{Н}^{-1}$ , единица — кубический метр на моль ( $\text{м}^3/\text{моль}$ ;  $\text{м}^3/\text{моль}$ ).

**Кубический метр на моль** равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества  $1 \text{ моль}$  объем  $1 \text{ м}^3$ .

**Молярная внутренняя энергия**  $U_m$  — величина, равная отношению внутренней энергии  $dU$  системы (тела) к ее количеству вещества  $dn$ :

$$U_m = dU/dn;$$

$\dim U_m = \text{Л}^2 \text{МТ}^{-2} \text{Н}^{-1}$ , единица — джоуль на моль ( $\text{Дж}/\text{моль}$ ;  $\text{Дж}/\text{моль}$ ).

**Джоуль на моль** равен молярной внутренней энергии вещества в количестве  $1 \text{ моль}$ , внутренняя энергия которого равна  $1 \text{ Дж}$ .

**Примечание.** В джоулях на моль выражаются также молярная энтальпия, химический потенциал, химическое сродство, энергия активации.

**Молярная теплоемкость**  $C_m$  — величина, равная отношению теплоемкости системы (тела) к ее количеству вещества:

$$C_m = C/n;$$

$\dim C_m = \text{Л}^2 \text{МТ}^{-2} \text{Н}^{-1}$ , единица — джоуль на моль-кельвин ( $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ).

**Джоуль на моль-кельвин** равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества  $1 \text{ моль}$  теплоемкость  $1 \text{ Дж}/\text{К}$ .

**Примечание.** В джоулях на моль-кельвин выражается также молярная энтропия.

**Концентрация молекул**  $n$  однородной системы — величина, равная отношению числа  $dN$  молекул системы к ее объему  $dV$ :

$$n = dN/dV;$$

$\dim n = \text{Л}^{-3}$ , единица — метр в минус третьей степени ( $\text{м}^{-3}$ ,  $\text{м}^{-3}$ ).

**Метр в минус третьей степени** равен концентрации молекул, при которой в элементе системы объемом  $1 \text{ м}^3$  содержится одна молекула.

**Молярная концентрация вещества**  $B$  в смеси (растворе, сплаве) — отношение количества вещества  $dn$  к объему  $dV$  смеси (раствора, сплава):

$$C_B = dn_B/dV;$$

$\dim C_B = \text{Л}^{-3} \text{Н}$ , единица — моль на кубический метр ( $\text{моль}/\text{м}^3$ ;  $\text{моль}/\text{м}^3$ ).

**Моль на кубический метр** равен молярной концентрации вещества в растворе, при которой в объеме раствора  $1 \text{ м}^3$  содержится количество растворенного вещества, равное  $1 \text{ моль}$ .

**Примечание.** Ранее для этой величины применяли термин «молярность», который теперь исключен из международных рекомендаций по терминологии физической химии.

**Моляльность**  $b_B$  раствора компонента — отношение количества вещества  $dn$  растворенного компонента к массе  $dm$  растворителя:

$$b_B = dn/dm;$$

$\dim b_B = \text{М}^{-1} \text{Н}$ , единица — моль на килограмм ( $\text{моль}/\text{кг}$ ;  $\text{моль}/\text{кг}$ ).

**Моль на килограмм** равен моляльности раствора, при которой на массу растворителя  $1 \text{ кг}$  приходится количество вещества, равное  $1 \text{ моль}$ .

**Примечание.** В молях на килограмм выражается также удельная адсорбция.

**Массовая концентрация компонента**  $B$  в смеси (растворе, сплаве) — величина, равная отношению массы  $dm$  компонента  $B$  к объему  $dV$  смеси (раствора, сплава):

$$\rho_B = dm_B/dV;$$

$\dim \rho_B = \text{Л}^{-3} \text{М}$ , единица — килограмм на кубический метр ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

**Килограмм на кубический метр** равен массовой концентрации компонента, при которой в объеме смеси (раствора, сплава)  $1 \text{ м}^3$  содержится компонент массой  $1 \text{ кг}$ .

**Скорость химической реакции**  $v$  — величина, равная отношению изменения  $\Delta C_B$  молярной концентрации исходного вещества в растворе к времени  $\Delta t$  реакции:

$$v = \Delta C_B / \Delta t;$$

$\dim v = \text{Л}^{-3} \text{Т}^{-1} \text{Н}$ , единица — моль в секунду на кубический метр ( $\text{моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ ;  $\text{моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ ).

**Моль в секунду на кубический метр** равен средней скорости одномолекулярной химической реакции, при которой за время  $1 \text{ с}$  молярная концентрация исходного вещества в растворе изменяется на  $1 \text{ моль}/\text{м}^3$ .

## АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

**Масса покоя** частицы, атома, ядра  $m$ ;  $\dim m = \text{М}$ , единица — килограмм ( $\text{кг}$ ;  $\text{кг}$ ).

**Дефект массы**  $\Delta m$ ;  $\dim \Delta m = \text{М}$ , единица — килограмм ( $\text{кг}$ ;  $\text{кг}$ ).

**Элементарный заряд**  $e$ ;  $\dim e = \text{ТI}$ , единица — кулон ( $\text{С}$ ;  $\text{Кл}$ ).

**Магнитный момент** атома, ядра  $\mu$ ;  $\dim \mu = \text{Л}^2 \text{I}$ , единица — ампер-квадратный метр ( $\text{А} \cdot \text{м}^2$ ;  $\text{А} \cdot \text{м}^2$ ).



Магнетон ядерный  $\mu_N$ ;  $\dim \mu_N = L^2 I$ , единица — ампер-квадратный метр ( $A \cdot m^2$ ;  $A \cdot m^2$ ).

Гиромангнитное отношение  $\gamma$ ;  $\dim \gamma = M^{-1} T I$ , единица — ампер-квадратный метр на джоуль-секунду ( $A \cdot m^2 / (J \cdot s)$ ;  $A \cdot m^2 / (Дж \cdot с)$ ).

Ядерный квадрупольный момент  $Q$ ;  $\dim Q = L^2$ , единица — квадратный метр ( $m^2$ ;  $m^2$ ).

Силовая постоянная колебательного спектра молекулы — размерность  $MT^{-2}$ , единица — ньютон на метр ( $N/m$ ;  $H/m$ ).

Энергия связи  $E_{св}$ ;  $\dim E_{св} = L^2 MT^{-2}$ , единица — джоуль ( $J$ ;  $Дж$ ).

Ширина уровня  $\Gamma$ ;  $\dim \Gamma = L^2 MT^{-2}$ , единица — джоуль ( $J$ ;  $Дж$ ).

Перенос (флюенс) частиц — размерность  $L^{-2}$ , единица — метр в минус второй степени ( $m^{-2}$ ;  $m^{-2}$ ).

Плотность потока частиц  $\phi$ ;  $\dim \phi = L^{-2} T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени ( $s^{-1} \cdot m^{-2}$ ;  $c^{-1} \cdot m^{-2}$ ).

Перенос (флюенс) энергии — размерность  $MT^{-2}$ , единица — джоуль на квадратный метр ( $J \cdot m^{-2}$ ;  $Дж \cdot m^{-2}$ ).

Эффективное сечение  $\sigma$ ;  $\dim \sigma = L^2$ , единица — квадратный метр ( $m^2$ ;  $m^2$ ).

Дифференциальное эффективное сечение  $d\sigma/d\Omega$ ;  $\dim (d\sigma/d\Omega) = L^2$ , единица — квадратный метр на стерадиан ( $m^2/сг$ ;  $m^2/ср$ ).

Спектральное эффективное сечение — размерность  $M^{-1} T^2$ , единица — квадратный метр на джоуль ( $m^2/J$ ;  $m^2/Дж$ ).

Линейный коэффициент ослабления  $\mu_l$ ;  $\dim \mu_l = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $m^{-1}$ ;  $m^{-1}$ ).

Атомный коэффициент ослабления  $\mu_a$ ;  $\dim \mu_a = L^2$ , единица — квадратный метр ( $m^2$ ;  $m^2$ ).

Массовый коэффициент ослабления  $\mu_m$ ;  $\dim \mu_m = L^2 M^{-1}$ , единица — квадратный метр на килограмм ( $m^2/kg$ ;  $m^2/кг$ ).

Массовый коэффициент преобразования энергии — размерность  $L^2 M^{-1}$ , единица — квадратный метр на килограмм ( $m^2/kg$ ;  $m^2/кг$ ).

Массовый коэффициент поглощения — размерность  $L^2 M^{-1}$ , единица — квадратный метр на килограмм ( $m^2/kg$ ;  $m^2/кг$ ).

Длина среднего пробега  $\langle l \rangle$ ;  $\dim \langle l \rangle = L$ , единица — метр ( $m$ ;  $m$ ).

Средний массовый пробег — размерность  $L^{-2} M$ , единица — килограмм на квадратный метр ( $kg/m^2$ ;  $кг/м^2$ ).

Линейная плотность ионизации — размерность  $L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $m^{-1}$ ;  $m^{-1}$ ).

Толщина слоя половинного ослабления  $d_{1/2}$ ;  $\dim d_{1/2} = L$ , единица — метр ( $m$ ;  $m$ ).

Тормозной эквивалент — размерность  $L$ , длина — метр ( $m$ ;  $m$ ).

Тормозная способность (линейная) — размерность  $LMT^{-2}$ , единица — джоуль на метр ( $J/m$ ;  $Дж/м$ ).

Линейное преобразование энергии — размерность  $LMT^{-2}$ , единица — джоуль на метр ( $J/m$ ;  $Дж/м$ ).

Средняя энергия ионообразования — размерность  $L^2 MT^{-2}$ , единица — джоуль ( $J$ ;  $Дж$ ).

Атомная тормозная способность — размерность  $L^4 MT^{-2}$ , единица — джоуль-квадратный метр ( $J \cdot m^2$ ;  $Дж \cdot м^2$ ).

Массовая тормозная способность — размерность  $L^4 T^{-2}$ , единица — джоуль-квадратный метр на килограмм ( $J \cdot m^2/kg$ ;  $Дж \cdot м^2/кг$ ).

Подвижность  $b$ ;  $\dim b = M^{-1} T^2 I$ , единица — квадратный метр на вольт-секунду ( $m^2/(V \cdot s)$ ;  $m^2/(В \cdot с)$ ).

Потоки нейтронов  $\Phi$ ;  $\dim \Phi = T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени ( $s^{-1}$ ;  $c^{-1}$ ).

Концентрация ионов, нейтронов  $n$ ;  $\dim n = L^{-3}$ , единица — метр в минус третьей степени ( $m^{-3}$ ;  $m^{-3}$ ).

Объемная скорость нейтронов — размерность  $L^{-3} T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени-метр в минус

третьей степени ( $s^{-1} \cdot m^{-3}$ ;  $c^{-1} \cdot m^{-3}$ ).

Плотность замедления — размерность  $L^{-3} T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени-метр в минус третьей степени ( $s^{-1} \cdot m^{-3}$ ;  $c^{-1} \cdot m^{-3}$ ).

Замедляющая способность среды — размерность  $L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $m^{-1}$ ;  $m^{-1}$ ).

Коэффициент диффузии для плотности потока нейтронов — размерность  $L$ , единица — метр ( $m$ ;  $m$ ).

Возраст нейтрона — размерность  $L^2$ , единица — квадратный метр ( $m^2$ ;  $m^2$ ).

### 1.3. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

#### Величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле

Энергия ионизирующих частиц  $E$ ;  $\dim E = L^2 MT^{-2}$ , единица — джоуль ( $J$ ;  $Дж$ ).

Предпочтительные единицы: эВ; кэВ; МэВ; ГэВ.

Энергия ионизирующего излучения  $\omega$  — суммарная энергия ионизирующих частиц (без учета энергии покоя), испущенная, переданная или поглощенная;  $\dim \omega = L^2 MT^{-2}$ , единица — джоуль ( $J$ ;  $Дж$ ).

Предпочтительные единицы: фДж; пДж; нДж; мкДж; мДж; Дж; кДж; МДж.

Масса покоя частицы, атома, атомного ядра  $m_a$ ;  $\dim m_a = M$ , единица — килограмм ( $kg$ ;  $кг$ ).

Предпочтительная единица: атомная единица массы (а.е.м.).

Поток ионизирующих частиц  $F$  — отношение числа ионизирующих частиц  $dN$ , проходящих через данную поверхность за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$F = dN/dt;$$

$\dim F = T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени ( $s^{-1}$ ;  $c^{-1}$ ).

Секунда в минус первой степени равна потоку ионизирующих частиц, при котором через данную поверхность за 1 с проходит одна частица.

Предпочтительные единицы:  $c^{-1}$ ; мин<sup>-1</sup>.

Перенос (флюенс) ионизирующих частиц  $\Phi$  — отношение числа ионизирующих частиц  $dN$ , проникающих в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\Phi = dN/dS;$$

$\dim \Phi = L^{-2}$ , единица — метр в минус второй степени ( $m^{-2}$ ;  $m^{-2}$ ).

Метр в минус второй степени равен переносу (флюенсу) ионизирующих частиц, при котором в сферу с площадью центрального сечения 1 м<sup>2</sup> проникает одна частица.

Предпочтительная единица: см<sup>-2</sup>.

Плотность потока ионизирующих частиц  $\phi$  — отношение потока ионизирующих частиц  $dF$ , проникающих в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\phi = dF/dS = d\Phi/dt = d^2N/(dS \cdot dt);$$

$\dim \phi = L^{-2} T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени ( $s^{-1} \cdot m^{-2}$ ;  $c^{-1} \cdot m^{-2}$ ).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени равен плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м<sup>2</sup> за 1 с проникает одна частица.

Предпочтительные единицы:  $c^{-1} \cdot см^{-2}$ ; мин<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>.

Энергетическая плотность потока ионизирующих частиц  $\varphi(E)$  — отношение плотности потока ионизирующих частиц  $\varphi$  с энергией от  $E$  до  $E+dE$  к энергетическому интервалу  $dE$ :

$$\varphi(E) = d\varphi/dE = d^2F/(dS \cdot dE) = d^2\Phi/(dt \cdot dE) = \\ = d^3N/(dS \cdot dt \cdot dE);$$

$\dim \varphi(E) = L^{-4}M^{-1}T$ , единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени ( $s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot J^{-1}$ ;  $s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Дж^{-1}$ ).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени равен энергетической плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$  проникает одна частица с энергией, заключенной в энергетическом интервале  $1 \text{ Дж}$ .

Предпочтительные единицы:  $s^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \times \text{эВ}^{-1}$ ;  $s^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{кэВ}^{-1}$ ;  $s^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{МэВ}^{-1}$ .

Угловая плотность потока ионизирующих частиц  $\varphi(\Omega)$  — отношение плотности потока ионизирующих частиц  $d\varphi$ , распространяющихся в пределах элементарного телесного угла  $d\Omega$ , ориентированного в направлении  $\Omega$ , к этому телесному углу:

$$\varphi(\Omega) = d\varphi/d\Omega = d^2\Phi/(dt \cdot d\Omega) = \\ = d^2F/(dS \cdot d\Omega) = d^3N/(dS \cdot dt \cdot d\Omega);$$

$\dim \varphi(\Omega) = L^2T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-стерадиан в минус первой степени ( $s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ;  $s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ ).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-стерадиан в минус первой степени равен угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную направлению движения частицы, за  $1 \text{ с}$  пересекает одна ионизирующая частица, движущаяся в телесном угле  $1 \text{ ср}$ .

Предпочтительная единица:  $s^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \times \text{ср}^{-1}$ .

Энергетическо-угловая плотность потока ионизирующих частиц  $\varphi(E, \Omega)$  — отношение плотности потока  $\varphi$  ионизирующих частиц с энергией от  $E$  до  $E+dE$ , распространяющихся в пределах элементарного телесного угла  $d\Omega$ , ориентированного в направлении  $\Omega$  к энергетическому интервалу  $dE$  и этому телесному углу:

$$\varphi(E, \Omega) = \frac{d^2\varphi}{dE \cdot d\Omega} = \frac{d^3F}{dS \cdot dE \cdot d\Omega} = \frac{d^3\Phi}{dt \cdot dE \cdot d\Omega} = \\ = \frac{d^4N}{dS \cdot dt \cdot dE \cdot d\Omega};$$

$\dim(E, \Omega) = L^{-4}M^{-1}T$ , единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени-стерадиан в минус первой степени ( $s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot J^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ;  $s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Дж^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени-стерадиан в минус первой степени равен энергетическо-угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную направлению движения частицы, за  $1 \text{ с}$  пересекает одна ионизирующая частица с энергией, заключенной в энергетическом интервале  $1 \text{ Дж}$ , движущаяся в телесном угле  $1 \text{ ср}$ .

Предпочтительные единицы:  $s^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \times \text{эВ}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ;  $s^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{кэВ}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ;  $s^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{МэВ}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ .

Поток энергии ионизирующего излучения  $F_w$  — отношение энергии ионизирующего излучения  $dW$ , проходящего через данную поверхность за интервал времени  $dt$ ,

к этому интервалу:

$$F_w = dW/dt;$$

$\dim F_w = L^2MT^{-3}$ , единица — ватт (W, Вт).

Ватт равен потоку энергии ионизирующего излучения, при котором через данную поверхность за  $1 \text{ с}$  проходит излучение с энергией  $1 \text{ Дж}$ .

Предпочтительные единицы: нВт; мкВт; мВт; Вт; кВт; МВт.

Перенос (флюенс) энергии ионизирующего излучения  $\Phi_w$  — отношение энергии ионизирующего излучения  $dW$ , проникающего в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\Phi_w = \frac{dW}{dS};$$

$\dim \Phi_w = MT^{-2}$ , единица — джоуль на квадратный метр ( $J/m^2$ ; Дж/м<sup>2</sup>).

Джоуль на квадратный метр равен переносу (флюенсу) энергии ионизирующего излучения, при котором в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  проникает излучение с энергией  $1 \text{ Дж}$ .

Предпочтительные единицы: фДж/см<sup>2</sup>; пДж/см<sup>2</sup>; нДж/см<sup>2</sup>; мкДж/см<sup>2</sup>; мДж/см<sup>2</sup>; Дж/см<sup>2</sup>; кДж/см<sup>2</sup>; МДж/см<sup>2</sup>.

Плотность потока энергии ионизирующего излучения  $\varphi_w$  — отношение потока энергии ионизирующего излучения  $dF_w$ , проникающего в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\varphi_w = \frac{dF_w}{dS} = \frac{d\Phi_w}{dt} = \frac{d^2W}{dS \cdot dt};$$

$\dim \varphi_w = MT^{-3}$ , единица — ватт на квадратный метр ( $W/m^2$ ; Вт/м<sup>2</sup>).

Ватт на квадратный метр равен плотности потока энергии ионизирующего излучения, при которой в сферу с площадью центрального сечения  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$  проникает излучение с энергией  $1 \text{ Дж}$ .

Предпочтительные единицы: нВт/см<sup>2</sup>; мкВт/см<sup>2</sup>; мВт/см<sup>2</sup>; Вт/см<sup>2</sup>; кВт/см<sup>2</sup>; МВт/см<sup>2</sup>.

## Величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Сечение взаимодействия ионизирующих частиц (сечение взаимодействия)  $\sigma_i$  — отношение числа  $n_i$  определенных ( $i$ -го) типа взаимодействий ионизирующих частиц с частиц-мишеней в элементарном объеме при переносе  $\Phi$  ионизирующих частиц к числу  $N$  частиц-мишеней в этом объеме и к этому переносу:

$$\sigma_i = \frac{n_i}{\Phi N};$$

$\dim \sigma_i = L^2$ , единица — квадратный метр ( $m^2$ ; м<sup>2</sup>).

Квадратный метр равен сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержащем одну частицу-мишень в  $1 \text{ м}^3$ , перенос падающих частиц  $1 \text{ м}^{-2}$  приводит в среднем к одному акту взаимодействия определенного типа в  $1 \text{ м}^3$ .

Предпочтительная единица: фм<sup>2</sup>.

Полное сечение взаимодействия ионизирующих частиц (полное сечение взаимодействия)  $\sigma$  — сумма всех сечений взаимодействия  $\sigma_i$  ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям или процессам:

$$\sigma = \sum_i \sigma_i;$$

$\dim \sigma = L^2$ , единица — квадратный метр ( $m^2$ ;  $m^2$ ).

**Квадратный метр** равен полному сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержащем одну частицу-мишень в  $1\text{ м}^3$ , перенос падающих частиц  $1\text{ м}^{-2}$  приводит в среднем к одному акту взаимодействия в  $1\text{ м}^3$ .

Предпочтительная единица:  $\text{фм}^2$ .

**Макроскопическое сечение взаимодействия ионизирующих частиц** (макроскопическое сечение взаимодействия)  $\Sigma_i$  — произведение сечения взаимодействия  $\sigma_i$  на концентрацию  $C$  частиц-мишеней в веществе:

$$\Sigma_i = \sigma_i C;$$

$\dim \Sigma_i = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $\text{м}^{-1}$ ;  $\text{м}^{-1}$ ).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^{-1}$ .

**Линейный коэффициент ослабления  $\mu$**  — отношение доли  $dN/N$  косвенно ионизирующих частиц, испытавших взаимодействие при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$\mu = \frac{1}{N} \frac{dN}{dl};$$

$\dim \mu = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $\text{м}^{-1}$ ;  $\text{м}^{-1}$ ).

**Метр в минус первой степени** равен линейному коэффициенту ослабления, при котором на пути  $1\text{ м}$  плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^{-1}$ .

**Массовый коэффициент ослабления  $\mu_m$**  — отношение линейного коэффициента ослабления  $\mu$  к плотности  $\rho$  вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dl};$$

$\dim \mu_m = L^2 M^{-1}$ , единица — квадратный метр на килограмм ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\text{м}^2/\text{кг}$ ).

**Квадратный метр на килограмм** равен массовому коэффициенту ослабления, при котором на пути в  $1\text{ м}$  в веществе с плотностью  $1\text{ кг}/\text{м}^3$  плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^2/\text{г}$ .

**Атомный коэффициент ослабления  $\mu_a$**  — отношение линейного коэффициента ослабления  $\mu$  к концентрации  $C$  атомов вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_a = \frac{\mu}{C} = \frac{1}{CN} \frac{dN}{dl};$$

$\dim \mu_a = L^2$ , единица — квадратный метр ( $\text{м}^2$ ;  $\text{м}^2$ ).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^2$ .

**Линейный коэффициент передачи энергии  $\mu_{tr}$**  — отношение доли энергии  $dW/W$  косвенно ионизирующего излучения (исключая энергию покоя частиц), которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$\mu_{tr} = \frac{1}{W} \frac{dW}{dl};$$

$\dim \mu_{tr} = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $\text{м}^{-1}$ ;  $\text{м}^{-1}$ ).

**Метр в минус первой степени** равен линейному коэффициенту передачи энергии, при котором в веществе на

пути  $1\text{ м}$  плотность потока энергии косвенно ионизирующего излучения уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^{-1}$ .

**Массовый коэффициент передачи энергии  $\mu_{tr,m}$**  — отношение линейного коэффициента передачи энергии  $\mu_{tr}$  к плотности  $\rho$  вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_{tr,m} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho W} \frac{dW}{dl};$$

$\dim \mu_{tr,m} = L^2 M^{-1}$ , единица — квадратный метр на килограмм ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\text{м}^2/\text{кг}$ ).

**Квадратный метр на килограмм** равен массовому коэффициенту передачи энергии, при котором на пути  $1\text{ м}$  в веществе с плотностью  $1\text{ кг}/\text{м}^3$  плотность потока энергии косвенно ионизирующего излучения уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^2/\text{г}$ .

**Линейный коэффициент поглощения энергии  $\mu_{en}$**  — произведение линейного коэффициента передачи энергии  $\mu_{tr}$  на разность между единицей и долей  $g$  энергии вторичных заряженных частиц, переходящей в тормозное излучение в данном веществе:

$$\mu_{en} = \mu_{tr} (1 - g);$$

$\dim \mu_{en} = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $\text{м}^{-1}$ ;  $\text{м}^{-1}$ ).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^{-1}$ .

**Массовый коэффициент поглощения энергии  $\mu_{en,m}$**  — отношение линейного коэффициента поглощения энергии  $\mu_{en}$  к плотности  $\rho$  вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_{en,m} = \frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr} (1 - g)}{\rho} = \mu_{tr,m} (1 - g);$$

$\dim \mu_{en,m} = L^2 M^{-1}$ , единица — квадратный метр на килограмм ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\text{м}^2/\text{кг}$ ).

Предпочтительная единица:  $\text{см}^2/\text{г}$ .

**Средний линейный пробег заряженной ионизирующей частицы  $R$**  — среднее значение модуля вектора между началом и концом пробега заряженной ионизирующей частицы в данном веществе;  $\dim R = L$ , единица — метр ( $\text{м}$ ;  $\text{м}$ ).

Предпочтительные единицы:  $\text{мкм}$ ;  $\text{мм}$ ;  $\text{см}$ ;  $\text{м}$ .

**Средний массовый пробег заряженной ионизирующей частицы  $R_m$**  — произведение среднего линейного пробега  $R$  заряженной ионизирующей частицы в данном веществе на плотность  $\rho$  этого вещества:

$$R_m = R\rho;$$

$\dim R_m = ML^{-2}$ , единица — килограмм на квадратный метр ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $\text{кг}/\text{м}^2$ ).

Предпочтительная единица:  $\text{г}/\text{см}^2$ .

**Линейная плотность ионизации  $i$**  — отношение числа  $dn$  ионов одного знака, образованных заряженной ионизирующей частицей на элементарном пути  $dl$ , к этому пути:

$$i = dn/dl;$$

$\dim i = L^{-1}$ , единица — метр в минус первой степени ( $\text{м}^{-1}$ ;  $\text{м}^{-1}$ ).

Предпочтительные единицы:  $\text{см}^{-1}$ ;  $\text{мкм}^{-1}$ .

**Линейная тормозная способность вещества  $S$**  — отношение энергии  $dE$ , теряемой заряженной ионизирующей частицей при прохождении элементарного пути  $dl$  в ве-

ществе, к длине этого пути:

$$\dot{S} = dE/dl;$$

$\dim S = \text{LMT}^{-2}$ , единица — джоуль на метр (J/м; Дж/м).

Предпочтительная единица: кэВ/мкм.

**Массовая тормозная способность вещества  $S_m$**  — отношение линейной тормозной способности  $S$  вещества к плотности  $\rho$  вещества:

$$S_m = \frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl};$$

$\dim S_m = \text{L}^4\text{T}^{-2}$ , единица — джоуль-метр в квадрате на килограмм (J·м<sup>2</sup>/кг; Дж·м<sup>2</sup>/кг).

Предпочтительные единицы: кэВ·см<sup>2</sup>/г; МэВ·см<sup>2</sup>/г.

**Атомная тормозная способность вещества  $S_a$**  — отношение линейной тормозной способности  $S$  вещества к концентрации  $C$  атомов этого вещества:

$$S_a = \frac{S}{C} = \frac{1}{C} \frac{dE}{dl};$$

$\dim S_a = \text{L}^4\text{MT}^{-2}$ , единица — джоуль-квадратный метр (J·м<sup>2</sup>; Дж·м<sup>2</sup>).

Предпочтительная единица: эВ·см<sup>2</sup>.

**Линейная передача энергии (ЛПЭ)  $L_\Delta$**  — отношение энергии  $dE_\Delta$ , переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути  $dl$ , к длине этого пути:

$$L_\Delta = dE_\Delta / dl;$$

$\dim L_\Delta = \text{LMT}^{-2}$ , единица — джоуль на метр (J/м; Дж/м).

Предпочтительная единица: кэВ/мкм.

**Средняя энергия ионообразования  $W$**  — отношение начальной кинетической энергии  $E$  заряженной ионизирующей частицы к среднему числу пар ионов  $N$ , образованных этой частицей до полной потери ее кинетической энергии в данном веществе:

$$W = E/N;$$

$\dim W = \text{L}^2\text{MT}^{-2}$ , единица — джоуль (J; Дж).

Предпочтительная единица: эВ.

**Массовая поверхностная плотность  $\rho_s$**  — отношение массы  $dm$  вещества элемента слоя с площадью  $dS$  поверхности к этой площади:

$$\rho_s = dm/dS;$$

$\dim \rho_s = \text{ML}^{-2}$ , единица — килограмм на квадратный метр (kg/m<sup>2</sup>; кг/м<sup>2</sup>).

**Килограмм на квадратный метр** равен массовой поверхностной плотности, при которой на 1 м<sup>2</sup> поверхности слоя равномерно распределена масса 1 кг.

Предпочтительные единицы: мг/см<sup>2</sup>; г/см<sup>2</sup>.

## Дозиметрические величины и единицы

**Поглощенная доза ионизирующего излучения** (доза излучения)  $D$  — отношение средней энергии  $dW$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$D = dW/dm;$$

$\dim D = \text{L}^2\text{T}^{-2}$ , единица — грэй (Gy; Гр).

**Грэй** равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нГр; мкГр; мГр; Гр; кГр; МГр.

**Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения** (мощность дозы излучения)  $\dot{D}$  — отношение приращения поглощенной дозы  $dD$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{D} = dD/dt;$$

$\dim \dot{D} = \text{L}^2\text{T}^{-3}$ , единица — грэй в секунду (Gy/s; Гр/с).

**Грэй в секунду** равен мощности поглощения дозы излучений, при которой за 1 с в веществе создается доза излучения 1 Гр.

Предпочтительные единицы: мГр/мин; Гр/мин; мГр/с; Гр/с; кГр/с.

**Керма  $K$**  — отношение суммы начальных кинетических энергий  $dE_K$  всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$K = dE_K/dm;$$

$\dim K = \text{L}^2\text{T}^{-2}$ , единица — грэй (Gy; Гр).

**Грэй** равен керме, при которой сумма начальных кинетических энергий всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нГр; мкГр; мГр; Гр; кГр; МГр.

**Мощность кермы  $\dot{K}$**  — отношение приращения кермы  $dK$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{K} = dK/dt;$$

$\dim \dot{K} = \text{L}^2\text{T}^{-3}$ , единица — грэй в секунду (Gy/s; Гр/с).

**Грэй в секунду** равен мощности кермы, при которой в веществе за 1 с создается керма 1 Гр.

Предпочтительные единицы: мГр/мин; Гр/мин; мГр/с; Гр/с; кГр/с.

**Экспозиционная доза фотонного излучения** (экспозиционная доза)  $X$  — отношение суммарного заряда  $dQ$  всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой  $dm$ , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$X = dQ/dm;$$

$\dim X = \text{M}^{-1}\text{TI}$ , единица — кулон на килограмм (C/kg; Кл/кг).

**Кулон на килограмм** равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в воздухе массой 1 кг, производят ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

**Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения** (мощность экспозиционной дозы)  $\dot{X}$  — отношение приращения экспозиционной дозы  $dX$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{X} = dX/dt;$$

$\dim \dot{X} = \text{M}^{-1}\text{I}$ , единица — ампер на килограмм (A/kg; А/кг).

**Ампер на килограмм** равен мощности экспозиционной дозы фотонного излучения, при которой за 1 с создается экспозиционная доза 1 Кл/кг.

**Примечание.** В процессе перехода на единицы СИ физические величины экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы подлежат изъятию из употребления.

**Эквивалентная доза ионизирующего излучения** (эквивалентная доза)  $H$  — произведение поглощенной дозы  $D$  на средний коэффициент качества  $k$  ионизирующего излу-

чения в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава:

$$H = Dk;$$

$\dim H = L^2 T^{-2}$ , единица — зиверт (Sv; Зв).

*Зиверт* равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг.

Предпочтительные единицы: мкЗв; мЗв. Мощность эквивалентной дозы ионизирующего излучения (мощность эквивалентной дозы)  $\dot{H}$  — отношение приращения  $dH$  эквивалентной дозы за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$\dot{H} = dH/dt;$$

$\dim \dot{H} = L^2 T^{-3}$ , единица — зиверт в секунду (Sv/s; Зв/с).

*Зиверт в секунду* равен мощности эквивалентной дозы, при которой за 1 с создается эквивалентная доза 1 Зв.

Предпочтительная единица: мкЗв/ч.

### Величины и единицы, характеризующие источники ионизирующих излучений

Активность радионуклида в источнике (образце) (активность радионуклида)  $A$  — отношение числа  $dN$  спонтанных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$A = dN/dt;$$

$\dim A = T^{-1}$ , единица — беккерель (Bq; Бк).

*Беккерель* равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит один спонтанный переход из определенного ядерно-энергетического состояния этого радионуклида.

Предпочтительные единицы: Бк; кБк; МБк; ГБк; ТБк; ПБк.

Удельная активность источника  $A_m$  — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце) к массе  $m$  источника (образца) или к массе элемента, соединения:

$$A_m = A/m;$$

$\dim A_m = M^{-1} T^{-1}$ , единица — беккерель на килограмм (Bq/kg; Бк/кг).

*Беккерель на килограмм* равен удельной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике (элементе, соединении) массой в 1 кг равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/г; кБк/г; МБк/г; ГБк/г; ТБк/г.

Объемная активность источника  $A_v$  — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце) к его объему  $V$ :

$$A_v = A/V;$$

$\dim A_v = L^{-3} T^{-1}$ , единица — беккерель на кубический метр (Bq/m<sup>3</sup>; Бк/м<sup>3</sup>).

*Беккерель на кубический метр* равен объемной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике объемом 1 м<sup>3</sup> равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/мл; кБк/мл; МБк/мл; ГБк/мл; ТБк/мл; ПБк/мл.

Молярная активность источника  $A_{mol}$  — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце) к числу молей  $N$  вещества (соединения), содержащего данный

радионуклид:

$$A_{mol} = A/N;$$

$\dim A_{mol} = T^{-1} N^{-1}$ , единица — беккерель на моль (Bq/mol; Бк/моль).

*Беккерель на моль* равен молярной активности, при которой в источнике (соединении), содержащем 1 моль радиоактивного вещества (соединения), активность равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: МБк/моль; ГБк/моль; МБк/ммоль; ГБк/ммоль; ТБк/ммоль.

Поверхностная активность источника  $A_s$  — отношение активности  $A$  радионуклида в источнике (образце), распределенной на поверхности источника, к площади  $S$  этой поверхности:

$$A_s = A/S;$$

$\dim A_s = L^{-2} T^{-1}$ , единица — беккерель на квадратный метр (Bq/m<sup>2</sup>; Бк/м<sup>2</sup>).

*Беккерель на квадратный метр* равен поверхностной активности, при которой активность радионуклида (радионуклидов), распределенного на поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>, равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/см<sup>2</sup>; кБк/см<sup>2</sup>; МБк/см<sup>2</sup>; ГБк/см<sup>2</sup>.

Постоянная мощности воздушной кермы радионуклида (керма-постоянная)  $\Gamma_\delta$  — отношение мощности воздушной кермы  $\dot{K}_\delta$ , создаваемой фотонами с энергией больше заданного порогового значения  $\delta$  от точечного изотропно-излучающего источника данного радионуклида, находящегося в вакууме на расстоянии  $l$  от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности  $A$  источника:

$$\Gamma_\delta = \dot{K}_\delta l^2/A;$$

$\dim \Gamma_\delta = L^4 T^{-2}$ , единица — грэй-метр в квадрате в секунду-беккерель (Gy·m<sup>2</sup>/(s·Bq); Гр·м<sup>2</sup>/(с·Бк)).

*Грэй-метр в квадрате в секунду-беккерель* равен постоянной мощности воздушной кермы радионуклида, при которой мощность воздушной кермы, создаваемой фотонным излучением с энергией больше  $\delta$ , точечного изотропно-излучающего источника активностью 1 Бк в вакууме на расстоянии 1 м равна 1 Гр/с.

Предпочтительная единица: аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк).

Керма-эквивалент источника  $K_e$  — мощность воздушной кермы фотонного излучения с энергией фотонов больше заданного порогового значения  $\delta$  точечного изотропно-излучающего источника, находящегося в вакууме, на расстоянии  $l$  от источника, умноженная на квадрат этого расстояния:

$$K_e = \dot{K} l^2;$$

$\dim K_e = L^4 T^{-2}$ , единица — грэй-метр в квадрате в секунду (Gy·m<sup>2</sup>/s; Гр·м<sup>2</sup>/с).

*Грэй-метр в квадрате в секунду* равен керма-эквиваленту источника, при котором точечный изотропно-излучающий источник фотонов с энергией фотонов, большей  $\delta$ , создает в вакууме на расстоянии 1 м мощность воздушной кермы 1 Гр/с.

Предпочтительные единицы: нГр·м<sup>2</sup>/с; мкГр·м<sup>2</sup>/с; мГр·м<sup>2</sup>/с; Гр·м<sup>2</sup>/с.

Постоянная радиоактивного распада радионуклида  $\lambda$  — отношение доли ядер  $dN/N$  радионуклида, распадающихся за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$\lambda = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt};$$

$\dim \lambda = T^{-1}$ , единица — секунда в минус первой степени ( $s^{-1}$ ;  $c^{-1}$ ).

Секунда в минус первой степени равна постоянной распада, при которой за 1 с число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма).

Предпочтительные единицы:  $s^{-1}$ ;  $\text{мин}^{-1}$ ;  $ч^{-1}$ ;  $\text{сут}^{-1}$ ;  $\text{год}^{-1}$ .

Период полураспада радионуклида  $T_{1/2}$  — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в 2 раза;  $\dim T_{1/2} = T$ , единица — секунда ( $s$ ,  $c$ ).

Предпочтительные единицы:  $s$ ;  $\text{мин}$ ;  $ч$ ;  $\text{сут}$ ;  $\text{год}$ .

Средняя продолжительность жизни радионуклида  $\tau$  — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма);  $\dim \tau = T$ , единица — секунда ( $s$ ;  $c$ ).

Предпочтительные единицы:  $s$ ;  $\text{мин}$ ;  $ч$ ;  $\text{сут}$ ;  $\text{год}$ .

## О порядке внедрения ГОСТ 8.417—81 в области измерения ионизирующих излучений

Методическими указаниями РД 50—454—84 установлен следующий порядок внедрения ГОСТ 8.417—81 в области ионизирующих излучений:

1. Предусматривается постепенное внедрение единиц СИ, т. е. допускается определенный переходный период, продолжительность которого определяется программами мероприятий по внедрению единиц СИ, разработанными министерствами и ведомствами СССР.

2. Учитывая широкое использование в различных отраслях народного хозяйства таких единиц, как рентген, рад, бэр и юри, устанавливается единый для всех министерств и ведомств СССР переходный период до 1 января 1990 г.

3. Во время переходного периода в научно-технической документации (НТД) и различных публикациях следует указывать значения поглощенной дозы, эквивалентной дозы, кермы, активности и производных от них величин в единицах, приведенных в Методических указаниях РД 50-454-84 в качестве предпочтительных, помещая в скобках, в отдельных графах таблиц, в примечаниях или сносках, на параллельных шкалах графиков значения этих величин во внесистемных единицах.

4. В программах мероприятий следует предусмотреть, что с 1 января 1990 г. все приборы для измерения величин, указанных в п. 3, рекомендуются градуировать в предпочтительных единицах.

5. Имея в виду постепенный отказ от практического использования экспозиционной дозы и ее мощности, во время переходного периода их значения указываются во внесистемных единицах ( $P$ ,  $P/s$  или в соответствующих дольных или кратных единицах). Значения этих величин в единицах СИ ( $Kл/кг$ ,  $A/кг$  или в соответствующих десятичных дольных и кратных единицах) приводить не следует. Отмеченное выше распространяется и на использование гамма-постоянной (постоянная мощности экспозиционной дозы). Использование экспозиционной дозы и ее мощности после 1 января 1990 г. не рекомендуется.

6. С введением Методических указаний РД 50—454—84 должна быть прекращена разработка новых приборов для измерения экспозиционной дозы и ее мощности.

7. Считать целесообразным постепенную замену при-

боров для измерения экспозиционной дозы и ее мощности приборами для измерения поглощенной дозы, кермы, эквивалентной дозы и их мощности, увязав общие технические требования к этой аппаратуре с рекомендациями международных организаций.

## 1.4. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЯ

| Мно-<br>житель | При-<br>ставка | Обозначение<br>приставки |              | Мно-<br>жи-<br>тель | При-<br>ставка | Обозначение<br>приставки |              |
|----------------|----------------|--------------------------|--------------|---------------------|----------------|--------------------------|--------------|
|                |                | междуна-<br>родное       | рус-<br>ское |                     |                | междуна-<br>родное       | рус-<br>ское |
| $10^{18}$      | экса           | E                        | Э            | $10^{-1}$           | деци           | d                        | д            |
| $10^{15}$      | пета           | P                        | П            | $10^{-2}$           | санти          | c                        | с            |
| $10^{12}$      | тера           | T                        | Т            | $10^{-3}$           | милли          | m                        | м            |
| $10^9$         | гига           | G                        | Г            | $10^{-6}$           | микро          | $\mu$                    | мк           |
| $10^6$         | мега           | M                        | М            | $10^{-9}$           | нано           | n                        | н            |
| $10^3$         | кило           | k                        | к            | $10^{-12}$          | пико           | p                        | п            |
| $10^2$         | гекто          | h                        | г            | $10^{-15}$          | фемто          | f                        | ф            |
| $10^1$         | дека           | da                       | да           | $10^{-18}$          | атто           | a                        | а            |

Примечания: 1. В соответствии с международным стандартом ИСО 31/0—74 десятичные кратные и дольные единицы не являются единицами СИ.

2. Приставки гекто, дека, деци и санти допускается применять только в наименованиях кратных и дольных единиц, уже получивших широкое распространение (гектар, декалитр, дециметр, сантиметр и др.).

При сложном наименовании производной единицы СИ приставку присоединяют к наименованию первой единицы, входящей в произведение или числитель дроби. Например,  $кПа \cdot с/м$ , но не  $Па \cdot кс/м$ .

В виде исключения из этого правила времени в обозначенных случаях, т. е. в случаях, когда это нашло широкое распространение, допускается присоединение приставки к наименованию единицы, входящей в знаменатель дроби. Например,  $кВ/см$ ,  $A/мм$ ,  $Бк/мл$ ,  $кВ/мкм$ .

Выбор десятичной кратной или дольной единицы от единицы СИ диктуется прежде всего удобством ее применения. Из многообразия кратных и дольных единиц, которые могут быть образованы при помощи приставок, выбирают единицу, приводящую к числовым значениям величины, приемлемым на практике. В принципе кратные и дольные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000. В табл. 1.12 приведены рекомендуемые для применения кратные и дольные единицы от единиц СИ.

Для снижения вероятности ошибок при расчетах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10.

Кроме десятичных кратных и дольных единиц допущены к использованию кратные и дольные единицы времени, плоского угла и относительных величин, не являющиеся десятичными. Например, единицы времени (минута, час, сутки), единицы плоского угла (градус, минута, секунда).

# 1.5. ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ, ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ

| Наименование величины | Единица                                               |                                         |                               | Соотношение с единицей СИ                                                                                                                                                      |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       | Наименование                                          | Обозначение                             |                               |                                                                                                                                                                                |
|                       |                                                       | международное                           | русское                       |                                                                                                                                                                                |
| Масса                 | тонна<br>атомная единица массы                        | t<br>u                                  | т<br>а. е. м.                 | $10^3$ кг<br>$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно)                                                                                                                      |
| Время*1               | минута<br>час<br>сутки                                | min<br>h<br>d                           | *мин<br>ч<br>сут              | 60 с<br>3600 с<br>86400 с                                                                                                                                                      |
| Плоский угол          | градус<br>минута<br>секунда<br>град*2                 | ...°<br>...'<br>...''<br>g<br>... (gon) | ...°<br>...'<br>...''<br>град | $(\pi/180)$ рад = $1,745329 \cdot 10^{-2}$ рад<br>$(\pi/10\ 800)$ рад = $2,908882 \cdot 10^{-4}$ рад<br>$(\pi/648\ 000)$ рад = $4,848137 \cdot 10^{-6}$ рад<br>$(\pi/200)$ рад |
| Объем, вместимость*3  | литр                                                  | l                                       | л                             | $10^{-3}$ м³                                                                                                                                                                   |
| Длина                 | астрономическая единица<br><br>световой год<br>парсек | u, а.<br><br>ly<br>pc                   | а. е.<br><br>св. год<br>пк    | $1,45598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)<br><br>$9,4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)<br>$3,0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)                                       |
| Оптическая сила       | диоптрия                                              | —                                       | дптр                          | $1\text{ м}^{-1}$                                                                                                                                                              |
| Площадь               | гектар                                                | ha                                      | га                            | $10^4\text{ м}^2$                                                                                                                                                              |
| Энергия               | электрон-вольт                                        | eV                                      | эВ                            | $1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизительно)                                                                                                                                   |
| Полная мощность       | вольт-ампер                                           | V·A                                     | В·А                           |                                                                                                                                                                                |
| Реактивная мощность   | вар                                                   | var                                     | вар                           |                                                                                                                                                                                |

\*1 Допускается также применять другие единицы, получившие широкое распространение, например неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. п.

\*2 Допускается применять по-русски наименование «гон».

\*3 Не рекомендуется применять при точных измерениях. При возможности смещения обозначения l с цифрой 1 допускается обозначение L.

Примечание. Единицы времени (минуту, час, сутки), плоского угла (градус, минуту, секунду), астрономическую единицу, световой год, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

## 1.6. ПЕРЕЧЕНЬ НЕКОТОРЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ И ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ ЕДИНИЦ

| Наименование величины                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Единица                                                     |                    |                                  | Определение                                                                                                                                                                 | Примечание                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Наименование                                                | Обозначение        |                                  |                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                             | междуна-<br>родное | рус-<br>ское                     |                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 1. Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную) КПД, относительное удлинение, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, магнитная восприимчивость, массовая доля, молярная доля и т. п. | единица (число 1)<br>процент<br>промилле<br>миллионная доля | —<br>%<br>‰<br>ppm | —<br>‰<br>‰<br>млн <sup>-1</sup> | 1<br>10 <sup>-2</sup><br>10 <sup>-3</sup><br>10 <sup>-6</sup>                                                                                                               | —<br>—<br>—<br>—                                                                                                                                                                                                                                       |
| 2. Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную):                                                                                                                                                                    | бел                                                         | В                  | Б                                | 1 Б = lg (P <sub>2</sub> /P <sub>1</sub> ) при P <sub>2</sub> = 10P <sub>1</sub> ,<br>1 Б = 2 lg (F <sub>2</sub> / F <sub>1</sub> ) при F <sub>2</sub> = √10 F <sub>1</sub> | P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> — одноименные энергетические величины (мощности, энергии, плотности энергии и т. п.)<br>F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> — одноименные «силовые» величины (напряжения, силы тока, давления, напряженности поля и т. п.) |

| Наименование величины                                                      | Единица      |                    |              | Определение                                                                                                                                             | Примечание           |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|                                                                            | Наименование | Обозначение        |              |                                                                                                                                                         |                      |
|                                                                            |              | междуна-<br>родное | рус-<br>ское |                                                                                                                                                         |                      |
| уровень звукового давления,<br>усиление, ослабление и т. п.)* <sup>1</sup> | децибел      | dB                 | дБ           | 0,1 Б                                                                                                                                                   | —                    |
| 3. То же, уровень громкости                                                | фон          | phon               | фон          | 1 фон равен уровню<br>громкости звука, для<br>которого уровень зву-<br>кового давления равно-<br>громкого с ним звука<br>частотой 1000 Гц равен<br>1 дБ |                      |
| 4. То же, частотный интервал                                               | октава       | —                  | —            | 1 октава равна<br>$\log_2 (f_2/f_1)$ при $f_2/f_1=2$                                                                                                    | $f_1, f_2$ — частоты |
|                                                                            | декада       | —                  | —            | 1 декада равна<br>$\lg (f_2/f_1)$ при $f_2/f_1=10$                                                                                                      |                      |

\*<sup>1</sup> В соответствии с публикацией 27—3 Международной электротехнической комиссии (МЭК) при необходимости указать исходную величину, ее значение помещают в скобках после обозначения логарифмической величины, например для уровня звукового давления  $L_p$  (ге 20 Pa) = 20 dB;  $L_p$  (ге 20 мкПа) = 20 дБ (ге — начальные буквы слова reference, т. е. исходный). При краткой форме записи значение исходной величины указывают в скобках после значений уровня, например 20 дБ (ге 20 Pa) или 20 дБ (ге 20 мкПа).

### 1.7. ЕДИНИЦЫ, ВРЕМЕННО ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ

| Наименование величины                                                                                                       | Единица          |               |         | Соотношение с единицей СИ                        | Примечание                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------|---------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                             | Наименование     | Обозначение   |         |                                                  |                                                                  |
|                                                                                                                             |                  | международное | русское |                                                  |                                                                  |
| Длина                                                                                                                       | Морская миля     | —             | миля    | 1852 м (точно)                                   | В морской навигации                                              |
| Масса                                                                                                                       | карат            | —             | кар     | $2 \cdot 10^{-4}$ кг (точно)                     | Для драгоценных камней и жемчуга                                 |
| Линейная плотность                                                                                                          | текс             | tex           | текс    | $10^{-6}$ кг/м (точно)                           | В текстильной промышленности                                     |
| Скорость                                                                                                                    | узел             | kn            | уз      | 0,514 (4) м/с                                    | В морской навигации                                              |
| Частота вращения                                                                                                            | оборот в секунду | —             | об/с    | $1 \text{ с}^{-1}$                               | —                                                                |
|                                                                                                                             | оборот в минуту  | —             | об/мин  | $1/60 \text{ с}^{-1} = 0,016 \text{ (6) с}^{-1}$ | —                                                                |
| Давление                                                                                                                    | бар              | bar           | бар     | $10^5$ Па                                        | —                                                                |
| Натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную | непер            | Np            | Нп      |                                                  | $1 \text{ Np} = 0,8686 \dots \text{ В} = 8,686 \dots \text{ дБ}$ |

Примечание. Приведенные в табл. 1.7 единицы временно допускаются применять до принятия по ним соответствующих международных решений.



# 1.8. СООТНОШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ С ЕДИНИЦАМИ СИ

| Наименование величины                                                                                                                                                        | Единица                                  |                      |                       | Соотношение с единицей СИ                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                              | Наименование                             | Обозначение          |                       |                                                                          |
|                                                                                                                                                                              |                                          | международное        | русское               |                                                                          |
| Длина                                                                                                                                                                        | ангстрем<br>икс-единица                  | Å<br>X               | Å<br>икс-ед           | 10 <sup>-10</sup> м<br>1,00206 · 10 <sup>-13</sup> м<br>(приблизительно) |
| Площадь                                                                                                                                                                      | барн                                     | b                    | б                     | 10 <sup>-28</sup> м <sup>2</sup>                                         |
| Масса                                                                                                                                                                        | центнер                                  | q                    | ц                     | 100 кг                                                                   |
| Телесный угол                                                                                                                                                                | квадратный градус                        | □°                   | □°                    | 3,0462 ... 10 <sup>-4</sup> ср                                           |
| Ускорение                                                                                                                                                                    | гал                                      | Gal                  | Гал                   | 0,01 м/с <sup>2</sup>                                                    |
| Сила, вес                                                                                                                                                                    | дина                                     | din                  | дин                   | 10 <sup>-5</sup> Н                                                       |
|                                                                                                                                                                              | килограмм-сила                           | kgf                  | кгс                   | 9,80665 Н (точно)                                                        |
|                                                                                                                                                                              | килопонд                                 | kp                   | —                     | 9,80665 Н »                                                              |
|                                                                                                                                                                              | грамм-сила                               | gf                   | гс                    | 9,80665 · 10 <sup>-3</sup> Н (точно)                                     |
|                                                                                                                                                                              | понд                                     | p                    | —                     | 9,80665 · 10 <sup>-3</sup> Н (точно)                                     |
|                                                                                                                                                                              | тонна-сила                               | tf                   | тс                    | 9806,65 Н (точно)                                                        |
| Давление                                                                                                                                                                     | килограмм-сила на квадратный сантим-метр | kgf/cm <sup>2</sup>  | кгс/см <sup>2</sup>   | 98066,5 Па (точно)                                                       |
|                                                                                                                                                                              | килопонд на квадратный сантиметр         | kp/cm <sup>2</sup>   | —                     | 98065,5 Н (точно)                                                        |
|                                                                                                                                                                              | миллиметр водяного столба                | mm H <sub>2</sub> O  | мм вод. ст.           | 9,80665 Па (точно)                                                       |
|                                                                                                                                                                              | миллиметр ртутного столба                | mm Hg                | мм рт. ст.            | 133,322 Па (точно)                                                       |
|                                                                                                                                                                              | торр                                     | Torr                 | —                     | 133,322 Па (точно)                                                       |
| Напряжение (механическое)                                                                                                                                                    | килограмм-сила на квадратный миллиметр   | kgf/mm <sup>2</sup>  | кгс/мм <sup>2</sup>   | 9,80665 · 10 <sup>6</sup> Па (точно)                                     |
|                                                                                                                                                                              | килопонд на квадратный миллиметр         | kp/mm <sup>2</sup>   | —                     | 9,80665 · 10 <sup>6</sup> Па (точно)                                     |
| Работа, энергия                                                                                                                                                              | эрг                                      | erg                  | эрг                   | 10 <sup>-7</sup> Дж                                                      |
| Мощность                                                                                                                                                                     | лошадиная сила                           | —                    | л. с.                 | 735,499 Вт                                                               |
| Динамическая вязкость                                                                                                                                                        | пуаз                                     | P                    | П                     | 0,1 Па·с                                                                 |
| Кинематическая вязкость                                                                                                                                                      | стокс                                    | St                   | Ст                    | 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с                                       |
| Удельное электрическое сопротивление                                                                                                                                         | ом-квадратный миллиметр на метр          | Ω mm <sup>2</sup> /m | Ом·мм <sup>2</sup> /м | 10 <sup>-6</sup> Ом·м                                                    |
| Магнитный поток                                                                                                                                                              | максвелл                                 | Mx                   | Мкс                   | 10 <sup>-8</sup> Вб                                                      |
| Магнитная индукция                                                                                                                                                           | гаусс                                    | Gs                   | Гс                    | 10 <sup>-4</sup> Тл                                                      |
| Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов                                                                                                                         | гильберт                                 | Gb                   | Гб                    | 10/(4π) А = 0,795775 ... А                                               |
| Напряженность магнитного поля                                                                                                                                                | эрстед                                   | Oe                   | Э                     | 10 <sup>3</sup> /(4π) А/м = 79,5775 ... А/м                              |
| Количество теплоты, термодинамический потенциал (внутренняя энергия, энтальпия, изохорно-изотермический потенциал), теплота фазового превращения, теплота химической реакции | калория (межд.)                          | cal                  | кал                   | 4,1868 Дж (точно)                                                        |
|                                                                                                                                                                              | калория термохимическая                  | cal <sub>th</sub>    | кал <sub>тх</sub>     | 4,1840 Дж (приблизительно)                                               |
|                                                                                                                                                                              | калория 15-градусная                     | cal <sub>15</sub>    | кал <sub>15</sub>     | 4,1855 Дж (приблизительно)                                               |
| Поглощенная доза излучения                                                                                                                                                   | рад                                      | rad, rd              | рад                   | 0,01 Гр                                                                  |
| Эквивалентная доза излучения, показатель эквивалентной дозы                                                                                                                  | бэр                                      | rem                  | бэр                   | 0,01 Зв                                                                  |
| Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза γ-и рентгеновского излучения)                                                                                   | рентген                                  | R                    | Р                     | 2,58 · 10 <sup>-4</sup> Кл/кг (точно)                                    |
| Активность нуклида в радиоактивном источнике                                                                                                                                 | кюри                                     | Ci                   | Ки                    | 3,700 · 10 <sup>10</sup> Бк (точно)                                      |
| Длина                                                                                                                                                                        | микрон                                   | μ                    | мк                    | 10 <sup>-6</sup> м                                                       |
| Угол поворота                                                                                                                                                                | оборот                                   | r                    | об                    | 2π рад = 6,28 ... рад                                                    |
| Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов                                                                                                                         | ампер-виток                              | At                   | ав                    | 1 А                                                                      |
| Яркость                                                                                                                                                                      | нит                                      | nt                   | нт                    | 1 кд/м <sup>2</sup>                                                      |
| Площадь                                                                                                                                                                      | ар                                       | a                    | а                     | 100 м <sup>2</sup>                                                       |

# 1.9. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМАХ СГС И СИ

| Наименование величины                                  | Соотношение между единицами                                                                                  |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сила электрического тока                               | 1 СГС (СГСЭ) = $3,33564 \cdot 10^{-10}$ А<br>1 СГСМ = 10 А                                                   |
| Количество электричества, Электрический заряд          | 1 СГС (СГСЭ) = $3,33564 \cdot 10^{-10}$ Кл<br>1 СГСМ = 10 Кл                                                 |
| Поверхностная плотность электрического заряда          | 1 СГС (СГСЭ) = $3,33564 \cdot 10^{-6}$ Кл/м <sup>2</sup><br>1 СГСМ = $10^6$ Кл/м <sup>2</sup>                |
| Пространственная плотность электрического заряда       | 1 СГС (СГСЭ) = $3,33564 \cdot 10^{-4}$ Кл/м <sup>3</sup><br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^7$ Кл/м <sup>3</sup>        |
| Напряженность электрического поля                      | 1 СГС (СГСЭ) = $2,997925 \cdot 10^4$ В/м<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-6}$ В/м                                   |
| Электрическое напряжение, электрический потенциал, ЭДС | 1 СГС (СГСЭ) = $2,997925 \cdot 10^2$ В<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-8}$ В                                       |
| Поток электрического смещения                          | 1 СГС (СГСЭ) = $2,65442 \cdot 10^{-11}$ Кл<br>1 СГСМ = $795775$ Кл                                           |
| Электрическое смещение                                 | 1 СГС (СГСЭ) = $2,65442 \cdot 10^{-7}$ Кл/м <sup>2</sup><br>1 СГСМ = $0,795775 \cdot 10^3$ Кл/м <sup>2</sup> |
| Электрическая ёмкость                                  | 1 СГС (СГСЭ) = $1,11265 \cdot 10^{-12}$ Ф<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^9$ Ф                                       |
| Абсолютная диэлектрическая проницаемость               | 1 СГС (СГСЭ) = $8,854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м<br>1 СГСМ = $7,95775 \cdot 10^9$ Ф/м                            |
| Электрический момент диполя                            | 1 СГС (СГСЭ) = $3,33564 \cdot 10^{-12}$ Кл·м<br>1 СГСМ = 0,1 Кл·м                                            |
| Плотность электрического тока                          | 1 СГС (СГСЭ) = $3,33564 \cdot 10^{-8}$ А/м <sup>2</sup><br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^5$ А/м <sup>2</sup>          |
| Линейная плотность электрического тока                 | 1 СГС (СГСЭ) = $3,33564 \cdot 10^{-8}$ А/м<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^3$ А/м                                    |
| Напряженность магнитного поля                          | 1 СГС (СГСМ), эрстед (Э) = $79,5775$ А/м<br>1 СГСЭ = $2,65442 \cdot 10^{-9}$ А/м                             |
| Магнитодвижущая сила, Разность магнитных потенциалов   | 1 СГС (СГСМ), гильберт (Гб) = $0,795775$ А<br>1 СГСЭ = $2,65442 \cdot 10^{-11}$ А                            |
| Магнитная индукция                                     | 1 СГС (СГСМ), гаусс (Гс) = $1 \cdot 10^{-4}$ Тл<br>1 СГСЭ = $2,997925 \cdot 10^6$ Тл                         |
| Магнитный поток                                        | 1 СГС (СГСМ), максвелл (Мкс) = $1 \cdot 10^{-8}$ Вб<br>1 СГСЭ = $299,7925$ Вб                                |
| Индуктивность, Взаимная индуктивность                  | 1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^{-9}$ Гн<br>1 СГСЭ = $8,98755 \cdot 10^{11}$ Гн                                   |
| Абсолютная магнитная проницаемость                     | 1 СГС (СГСМ) = $1,256637 \cdot 10^{-8}$ Гн/м<br>1 СГСЭ = $1,12941 \cdot 10^{15}$ Гн/м                        |
| Магнитный момент (амперовский)                         | 1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^{-3}$ А·м <sup>2</sup><br>1 СГСЭ = $3,33564 \cdot 10^{-14}$ А·м <sup>2</sup>      |
| Магнитный момент (кулоновский)                         | 1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^{-10}$ Вб/м<br>1 СГСЭ = $2,997925$ Вб·м                                           |
| Намагниченность                                        | 1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^3$ А/м<br>1 СГСЭ = $3,33564 \cdot 10^{-8}$ А/м                                    |
| Электрическое сопротивление                            | 1 СГС (СГСЭ) = $8,98755 \cdot 10^{11}$ Ом<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-9}$ Ом                                   |
| Электрическая проводимость                             | 1 СГС (СГСЭ) = $1,11265 \cdot 10^{-12}$ См<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^9$ См                                     |
| Удельное электрическое сопротивление                   | 1 СГС (СГСЭ) = $8,98755 \cdot 10^9$ Ом·м<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-11}$ Ом·м                                 |
| Удельная электрическая проводимость                    | 1 СГС (СГСЭ) = $1,11265 \cdot 10^{-10}$ См/м<br>1 СГСМ = $1 \cdot 10^{11}$ См/м                              |
| Магнитное сопротивление                                | 1 СГС (СГСМ) = $79,5775 \cdot 10^6$ А/Вб<br>1 СГСЭ = $8,854186 \cdot 10^{-14}$ А/Вб                          |
| Магнитная проводимость                                 | 1 СГС (СГСМ) = $1,256637 \cdot 10^{-3}$ Вб/А<br>1 СГСЭ = $1,12941 \cdot 10^{13}$ Вб/А                        |

## 1.10. СООТНОШЕНИЯ

## ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ЕДИНИЦАМИ СИ

| Наименование величины                                     | Внесистемные единицы                                                |                                            |                                            | Соотношение с единицей СИ                |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                                           | Наименование                                                        | Обозначение                                |                                            |                                          |
|                                                           |                                                                     | международное                              | русское                                    |                                          |
| Плотность потока ионизирующих частиц                      | сантиметр в минус второй степени-час в минус первой степени         | см <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>          | см <sup>-2</sup> ·ч <sup>-1</sup>          | 2,778·м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>    |
| Интенсивность излучения                                   | эрг-сантиметр в минус второй степени-секунда в минус первой степени | erg·(см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> )   | эрг·(см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> )   | 10 <sup>-3</sup> Вт/м <sup>2</sup>       |
|                                                           | эрг-сантиметр в минус второй степени-минута в минус первой степени  | erg·(см <sup>-2</sup> ·мин <sup>-1</sup> ) | эрг·(см <sup>-2</sup> ·мин <sup>-1</sup> ) | 1,667·10 <sup>-5</sup> Вт/м <sup>2</sup> |
|                                                           | эрг-сантиметр в минус второй степени-час в минус первой степени     | erg·(см <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )   | эрг·(см <sup>-2</sup> ·ч <sup>-1</sup> )   | 2,778·10 <sup>-7</sup> Вт/м <sup>2</sup> |
| Поглощенная доза излучения                                | эрг-грамм в минус первой степени                                    | erg·g <sup>-1</sup>                        | эрг·г <sup>-1</sup>                        | 10 <sup>-4</sup> Дж/кг                   |
|                                                           | рад                                                                 | rad                                        | рад                                        | 0,01 Гр                                  |
| Мощность поглощенной дозы излучения                       | эрг-грамм в минус первой степени-секунда в минус первой степени     | erg·(г <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup> )    | эрг·(г <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup> )    | 10 <sup>-4</sup> Вт/кг                   |
|                                                           | рад-секунда в минус первой степени                                  | rad·с <sup>-1</sup>                        | рад·с <sup>-1</sup>                        | 0,01 Гр/с                                |
|                                                           | рад-час в минус первой степени                                      | rad·h <sup>-1</sup>                        | рад·ч <sup>-1</sup>                        | 2,778·10 <sup>-6</sup> Гр/с              |
| Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений          | рентген                                                             | R                                          | P                                          | 2,58·10 <sup>-4</sup> Кл/кг              |
| Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучений | рентген в секунду                                                   | R/s                                        | P/с                                        | 2,58·10 <sup>-4</sup> А/кг               |
|                                                           | рентген в минуту                                                    | R/мин                                      | P/мин                                      | 4,3·10 <sup>-6</sup> А/кг                |
|                                                           | рентген в час                                                       | R/h                                        | P/ч                                        | 7,17·10 <sup>-8</sup> А/кг               |

1.11. СООТНОШЕНИЕ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ ЕДИНИЦ ХАРТРИ  $e = m_e = \hbar$  И СИСТЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЕДИНИЦ  $c = m_e = \hbar$  С ЕДИНИЦАМИ СИ

| Величина                              | Единица системы $m_e, \hbar, e$                    | Единица системы $m_e, \hbar, c$                    |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Длина                                 | $5,292 \cdot 10^{-11} \text{ м}$                   | $3,862 \cdot 10^{-13} \text{ м}$                   |
| Время                                 | $2,419 \cdot 10^{-17} \text{ с}$                   | $1,288 \cdot 10^{-21} \text{ с}$                   |
| Площадь                               | $2,800 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2$                 | $1,491 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$                 |
| Скорость                              | $2,188 \cdot 10^6 \text{ м/с}$                     | $2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$                     |
| Ускорение                             | $9,043 \cdot 10^{22} \text{ м/с}^2$                | $2,327 \cdot 10^{29} \text{ м/с}^2$                |
| Масса                                 | $9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$                  | $9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$                  |
| Сила                                  | $8,237 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$                    | $2,120 \cdot 10^{-1} \text{ Н}$                    |
| Импульс (количество движения)         | $1,993 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ | $2,731 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ |
| Момент силы                           | $4,360 \cdot 10^{-18} \text{ Н} \cdot \text{м}$    | $8,187 \cdot 10^{-14} \text{ Н} \cdot \text{м}$    |
| Момент импульса (количество движения) | $1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$   | $1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$   |
| Работа, энергия                       | $4,360 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$                  | $8,187 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$                  |
| Электрический заряд                   | $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$                  | $1,876 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$                  |
| Сила тока                             | $6,624 \cdot 10^{-3} \text{ А}$                    | $1,456 \cdot 10^3 \text{ А}$                       |
| Напряженность электрического поля     | $5,130 \cdot 10^{11} \text{ В/м}$                  | $1,131 \cdot 10^{17} \text{ В/м}$                  |
| Потенциал                             | $27,22 \text{ В}$                                  | $4,366 \cdot 10^4 \text{ В}$                       |
| Магнитная индукция                    | $1,715 \cdot 10^3 \text{ Тл}$                      | $3,771 \cdot 10^8 \text{ Тл}$                      |
| Магнитный момент                      | $2,542 \cdot 10^{-21} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  | $2,171 \cdot 10^{-22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$  |

# 1.12. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ ОТ ЕДИНИЦ СИ И ОТ ЕДИНИЦ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Продолжение табл. 1.12

| Наименование<br>величины | Обозначения рекомендуемых<br>кратных и дольных единиц |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
|--------------------------|-------------------------------------------------------|

## Часть I. Пространство и время

|                    |                                                                         |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Плоский угол       | мрад, мкрад                                                             |
| Длина              | км, см, мм, мкм, нм                                                     |
| Площадь            | км <sup>2</sup> , дм <sup>2</sup> , см <sup>2</sup> , мм <sup>2</sup>   |
| Объем, вместимость | дм <sup>3</sup> , см <sup>3</sup> , мм <sup>3</sup> , гл, дл,<br>сл, мл |
| Время              | кс, мс, мкс, нс                                                         |
| Скорость           | км/ч                                                                    |

## Часть II. Периодические и связанные с ними явления

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| Частота периодического процесса | ТГц, ГГц, МГц, кГц |
|---------------------------------|--------------------|

## Часть III. Механика

|                         |                                                                           |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Масса                   | Мг, г, мг, мкг, Мт,<br>кт, дт                                             |
| Линейная плотность      | мг/м, г/км                                                                |
| Плотность               | Мг/м <sup>3</sup> , кг/дм <sup>3</sup> , г/см <sup>3</sup> ,<br>г/мл, г/л |
| Сила, вес               | МН, кН, мН, мкН                                                           |
| Момент силы             | МН·м, кН·м, мН·м,<br>мкН·м                                                |
| Давление                | ГПа, МПа, кПа, гПа,<br>даПа, мПа, мкПа                                    |
| Напряжение              | ГПа, МПа, кПа                                                             |
| Динамическая вязкость   | МПа·с                                                                     |
| Кинематическая вязкость | мм <sup>2</sup> /с                                                        |
| Поверхностное натяжение | мН/м                                                                      |
| Энергия, работа         | ТДж, ГДж, МДж,<br>кДж, мДж, ГэВ, МэВ,<br>кэВ                              |
| Мощность                | ГВт, МВт, кВт, мВт,<br>мкВт                                               |

## Часть IV. Теплота

|                                       |                            |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Температура                           | МК, кК, МК, мкК            |
| Теплота, количество теплоты           | ТДж, ГДж, МДж,<br>кДж, мДж |
| Тепловой поток                        | кВт, мВт                   |
| Теплоемкость                          | кДж/К                      |
| Удельная теплоемкость                 | кДж/(кг·К)                 |
| Энтропия                              | кДж/К                      |
| Удельная энтропия                     | кДж/(кг·К)                 |
| Удельное количество теплоты           | МДж/кг, кДж/кг             |
| Удельная теплота фазового превращения | МДж/кг, кДж/кг             |

## Часть V. Электричество и магнетизм

|                                                  |                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Электрический ток (сила электрического тока)     | кА, МА, мкА, нА, пА                                                                                                                |
| Количество электричества, электрический заряд    | кКл, мкКл, нКл, пКл                                                                                                                |
| Пространственная плотность электрического заряда | Кл/мм <sup>3</sup> , МКл/м <sup>3</sup> ,<br>Кл/см <sup>3</sup> , кКл/м <sup>3</sup> ,<br>МКл/м <sup>3</sup> , мкКл/м <sup>3</sup> |
| Поверхностная плотность электрического заряда    | МКл/м <sup>2</sup> , Кл/мм <sup>2</sup> ,<br>Кл/см <sup>2</sup> , кКл/м <sup>2</sup> ,<br>МКл/м <sup>2</sup> , мкКл/м <sup>2</sup> |

| Наименование<br>величины | Обозначения рекомендуемых<br>кратных и дольных единиц |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
|--------------------------|-------------------------------------------------------|

|                                                                                                             |                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Напряженность электрического поля                                                                           | МВ/м, кВ/м, В/мм,<br>В/см, мВ/м, мкВ/м                                                                                                                                    |
| Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила | МВ, кВ, мВ, мкВ, нВ                                                                                                                                                       |
| Электрическое смещение                                                                                      | Кл/см <sup>2</sup> , кКл/см <sup>2</sup> ,<br>МКл/м <sup>2</sup> , мкКл/м <sup>2</sup><br>МКл, кКл, мКл                                                                   |
| Поток электрического смещения                                                                               | мФ, мкФ, нФ, пФ                                                                                                                                                           |
| Электрическая емкость                                                                                       | мкФ/м, нФ/м, пФ/м                                                                                                                                                         |
| Абсолютная диэлектрическая проницаемость, электрическая постоянная                                          | Кл/см <sup>2</sup> , кКл/м <sup>2</sup> ,<br>МКл/м <sup>2</sup> , мкКл/м <sup>2</sup><br>МА/м <sup>2</sup> , А/мм <sup>2</sup> , А/см <sup>2</sup> ,<br>кА/м <sup>2</sup> |
| Поляризованность                                                                                            | кА/м, А/мм, А/см                                                                                                                                                          |
| Плотность электрического тока                                                                               | кА/м, А/мм, А/см                                                                                                                                                          |
| Линейная плотность электрического тока                                                                      | кА, мА                                                                                                                                                                    |
| Напряженность магнитного поля                                                                               | мТл, мкТл, нТл                                                                                                                                                            |
| Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов                                                        | мВб                                                                                                                                                                       |
| Магнитная индукция, плотность магнитного потока                                                             | кТл·м                                                                                                                                                                     |
| Магнитный поток                                                                                             | мГн, мкГн, нГн, пГн                                                                                                                                                       |
| Магнитный векторный потенциал                                                                               | мкГн/м, нГн/м                                                                                                                                                             |
| Индуктивность, взаимная индуктивность                                                                       | кА/м, А/мм                                                                                                                                                                |
| Абсолютная магнитная проницаемость, магнитная постоянная                                                    | мТл, ГОм, ГОм, КОм,<br>МОм, мКОм                                                                                                                                          |
| Намагниченность                                                                                             | кСм, мСм, мкСм                                                                                                                                                            |
| Магнитная поляризация                                                                                       | ГОм·м, МОм·м, КОм·м,<br>Ом·см, МОм·м, мКОм·м,<br>нОм·м                                                                                                                    |
| Электрическое сопротивление                                                                                 | МСм/м, кСм/м                                                                                                                                                              |
| Электрическая проводимость                                                                                  | МОм, КОм, МОм                                                                                                                                                             |
| Удельное электрическое сопротивление                                                                        | кСм, мСм                                                                                                                                                                  |
| Удельная электрическая проводимость                                                                         | мкСм                                                                                                                                                                      |
| Полное сопротивление                                                                                        | кСм, мСм                                                                                                                                                                  |
| Полная проводимость                                                                                         | кСм, мСм                                                                                                                                                                  |
| Активная проводимость                                                                                       | ТВт, ГВт, МВт, кВт,<br>мВт, мкВт, нВт                                                                                                                                     |
| Реактивная проводимость                                                                                     |                                                                                                                                                                           |
| Активная мощность                                                                                           |                                                                                                                                                                           |

## Часть VI. Свет и связанные с ним электромагнитные излучения

|                  |                  |
|------------------|------------------|
| Длина волны      | мкм, нм, пм      |
| Волновое число   | см <sup>-1</sup> |
| Световая энергия | лм·ч             |

| Наименование<br>величины | Обозначения рекомендуемых<br>кратных и дольных единиц |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
|--------------------------|-------------------------------------------------------|

## Часть VII. Акустика

|                                           |                                                               |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Период                                    | мс, мкс                                                       |
| Частота периодического процесса           | МГц, кГц                                                      |
| Длина волны                               | мм                                                            |
| Звуковое давление                         | мПа, мкПа                                                     |
| Скорость колебания частицы                | мм/с                                                          |
| Поток звуковой энергии, звуковая мощность | кВт, мВт, мкВт, пВт                                           |
| Интенсивность звука                       | мВт/м <sup>2</sup> , мкВт/м <sup>2</sup> , пВт/м <sup>2</sup> |

## Часть VIII. Физическая химия и молекулярная физика

|                             |                                                      |
|-----------------------------|------------------------------------------------------|
| Количество вещества         | кмоль, ммоль, мкмоль                                 |
| Молярная масса              | г/моль                                               |
| Молярный объем              | дм <sup>3</sup> /моль, см <sup>3</sup> /моль, л/моль |
| Молярная внутренняя энергия | кДж/моль                                             |
| Молярная энтальпия          | кДж/моль                                             |
| Химический потенциал        | кДж/моль                                             |
| Химическое сродство         | кмоль/м <sup>3</sup> , моль/л, моль/дм <sup>3</sup>  |
| Молярная концентрация       | ммоль/кг                                             |
| Удельная адсорбция          |                                                      |

## Часть IX. Ионизирующие излучения

|                                                                                                           |                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Поглощенная доза излучения, керма, показатель поглощенной дозы (поглощенная доза ионизирующего излучения) | ТГр, ГГр, МГр, кГр, мГр, мкГр |
| Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)                                    | ЭБк, ПБк, ТБк, ГБк, МБк, кБк  |

## 1.13. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

## Длина

Ангстрем (Å, Å)\*<sup>1</sup>; 1 Å=10<sup>-10</sup> м

Астрономическая единица (у.а., а.е.); 1 а.е.=1,49597870 × 10<sup>11</sup> м

Дюйм (in, —); 1 дюйм=0,025 4 м (точно)

Икс-единица (X, икс-ед); 1 икс-ед=1,00206 · 10<sup>-18</sup> м

Кабельтов (—, —); 1 кабельтов=185,2 м

Микрон (μ, мк); 1 мк=1 · 10<sup>-6</sup> м

Миля морская (п. mile, —); 1 миля морская=1852 м (точно)

Миля сухопутная (mile, —); 1 миля сухопутная=1609,344 м (точно)

Парсек (pk, пк); 1 пк=3,085678 · 10<sup>16</sup> м

\*<sup>1</sup> В скобках даны международное и русское обозначения единиц. В случае отсутствия обозначения единицы вместо него сделан прочерк.

Световой год (ly, св. год); 1 св. год=9,490530 · 10<sup>15</sup> м

Ферми (—, —); 1 ферми=1 · 10<sup>-15</sup> м

Фут (ft, —); 1 фут=0,3048 м (точно)

Ярд (yd, —); 1 ярд=0,9144 м (точно)

## Площадь

Ар (a, a); 1 a=100 м<sup>2</sup>

Барн (b, б); 1 б=1 · 10<sup>-28</sup> м<sup>2</sup>

Гектар (ha, га); 1 га=1 · 10<sup>4</sup> м<sup>2</sup>

Квадратный дюйм (in<sup>2</sup>, —); 1 кв. дюйм=6,4516 · 10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup> (точно)

Квадратный фут (ft<sup>2</sup>, —); 1 кв. фут=9,29030 · 10<sup>-2</sup> м<sup>2</sup>

Квадратный ярд (yd<sup>2</sup>, —); 1 кв. ярд=0,83613 м<sup>2</sup>

## Объем

Баррель (Великобрит.) (для сыпучих веществ) (—, —); 1 баррель (Великобрит.)=0,16365 м<sup>3</sup>

Баррель нефтяной (США) (—, —); 1 баррель нефтяной (США)=0,158988 м<sup>3</sup>

Баррель сухой (США) [bbbl (US), —]; 1 баррель сухой (США)=0,115628 м<sup>3</sup>

Бушель (Великобрит.) (—, —); 1 бушель (Великобрит.)=3,63687 · 10<sup>-2</sup> м<sup>3</sup>

Бушель (США) (bu, —); 1 бушель (США)=3,52393 × 10<sup>-2</sup> м<sup>3</sup>

Галлон (Великобрит.) [gal (UK), —]; 1 галлон (Великобрит.)=4,54609 · 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>

Галлон для жидкостей (США) [gal (US), —]; 1 галлон для жидкостей (США)=3,78543 · 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>

Галлон для сыпучих веществ (США) (—, —); 1 галлон для сыпучих веществ (США)=4,405 · 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>

Дюйм кубический (in<sup>3</sup>, —); 1 дюйм кубический=1,63871 · 10<sup>-5</sup> м<sup>3</sup>

Литр (l, л); 1 л=1 · 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>

Лямбда (λ, λ); 1 λ=1 · 10<sup>-9</sup> м<sup>3</sup>

Пинта (Великобрит.) [pt (UK), —]; 1 пинта (Великобрит.)=5,68261 · 10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>

Пинта для жидкостей (США) [lig pt (US), —]; 1 пинта для жидкостей (США)=4,73179 · 10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>

Пинта для сыпучих веществ (США) [dry pt (US), —]; 1 пинта для сыпучих веществ (США)=5,50614 × 10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>

Унция (Великобрит.) [fl. oz (UK), —]; 1 унция (Великобрит.)=2,841 · 10<sup>-5</sup> м<sup>3</sup>

Унция (США) [fl. oz (US), —]; 1 унция (США)=2,957 × 10<sup>-5</sup> м<sup>3</sup>

Фут кубический (ft, —); 1 фут кубический=2,83168 × 10<sup>-2</sup> м<sup>3</sup>

Ярд кубический (yd<sup>3</sup>, —); 1 ярд кубический=0,76455 м<sup>3</sup>

## Плоский угол

Град, гон (...°, град); 1 град=0,01570796 рад

Градус (...°, ...°); 1°=0,01745329 рад

Минута (...', ...'); 1'=2,908882 · 10<sup>-4</sup> рад

Полный угол, оборот (—, об); 1 об=6,283185 рад

Прямой угол (...°, ...°); 1°=1,570796 рад

Румб в метеорологии (—, —); 1 румб в метеорологии=0,392699 рад

Румб в морской навигации (—, —); 1 румб в морской навигации=0,1963495 рад

Секунда (...", ..."); 1"=4,848137 · 10<sup>-6</sup> рад

## Телесный угол

Квадратный градус (□°, □°); 1□°=3,0462 · 10<sup>-4</sup> ср

Полный телесный угол (—, —); 1 полный телесный угол=12,56637 ср

## Время

Год (а, год); 1 год =  $3,15569259747 \cdot 10^7$  с (на 1900 г., за 100 лет год сокращается на 0,5305 с)  
Минута (min, мин); 1 мин = 60 с  
Сутки (d, сут); 1 сут = 86 400 с  
Час (h, ч); 1 ч = 3600 с

## Температура

Градус Ранкина ( $^{\circ}\text{Ra}$ ,  $^{\circ}\text{Ra}$ );  $1^{\circ}\text{Ra} = 0,556$  К  
Градус Реомюра ( $^{\circ}\text{R}$ ,  $^{\circ}\text{R}$ );  $1^{\circ}\text{R} = 1,25$  К  
Градус Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ,  $^{\circ}\text{F}$ );  $1^{\circ}\text{F} = 0,556$  К  
Градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ );  $1^{\circ}\text{C} = 1$  К

## Скорость

Километр в час (km/h, км/ч); 1 км/ч = 0,277 7 м/с  
Миля в час (mile/h, —); 1 мили в час = 0,44704 м/с (точно)  
Узел морской (kn, уз); 1 уз = 0,514444 м/с  
Фут в секунду (ft/s, —); 1 фут в секунду = 0,3048 м/с (точно)

## Ускорение

Гал (Gal, Гал); 1 Гал = 0,01 м/с<sup>2</sup>

## Угловая скорость

Градус в секунду ( $^{\circ}/\text{s}$ ,  $^{\circ}/\text{c}$ );  $1^{\circ}/\text{c} = 0,017453$  рад/с  
Полный угол в минуту (—, —); 1 полный угол в минуту = 0,1047197 рад/с  
Полный угол в секунду (—, —); 1 полный угол в секунду = 6,283185 рад/с  
Прямой угол в секунду ( $^{\circ}/\text{s}$ ,  $^{\circ}/\text{c}$ );  $1^{\circ}/\text{c} = 1,57080$  рад/с  
Радиян в минуту (rad/min, рад/мин); 1 рад/мин = 0,0166667 рад/с

## Частота вращения

Оборот в минуту (—, об/мин); 1 об/мин = 0,016 (6) с<sup>-1</sup>  
Оборот в секунду (—, об/с); 1 об/с = 1 с<sup>-1</sup>

## Масса

Атомная единица массы (u, а.е.м.); 1 а.е.м. =  $1,66056 \times 10^{-27}$  кг  
Гамма (γ, —); 1 гамма =  $1 \cdot 10^{-9}$  кг  
Грамм (g, г); 1 г =  $1 \cdot 10^{-3}$  кг  
Гран (gg, —); 1 гран =  $6,479891 \cdot 10^{-5}$  кг  
Карат (—, кар); 1 кар =  $2 \cdot 10^{-4}$  кг (точно)  
Слаг (slug, —); 1 слаг = 14,5939 кг  
Техническая единица массы (—, т.е.м.); 1 т.е.м. = 9,8066 кг (точно)  
Тонна (t, т); 1 т = 1000 кг  
Тонна (Великобрит.) (ton, —); 1 тонна (Великобрит.) = 1016,05 кг  
Тонна короткая (Великобрит.) (sh. ton, —); 1 тонна короткая (Великобрит.) = 907,185 кг  
Унция аптекарская (oz apoth, —); 1 унция аптекарская =  $31,1035 \cdot 10^{-3}$  кг  
Унция аптекарская (русская) (—, —); 1 унция аптекарская (русская) =  $2,986 \cdot 10^{-2}$  кг  
Унция торговая (oz, —); 1 унция торговая =  $28,3495 \times 10^{-3}$  кг  
Унция тройская (oz tr, —); 1 унция тройская =  $31,1035 \times 10^{-3}$  кг  
Фунт торговый (lb, —); 1 фунт торговый = 0,45359237 кг

Фунт в системе рус. мер (—, —); 1 фунт в системе рус. мер = 0,40951241 кг  
Фунт (США) [lb (US), —]; 1 фунт (США) = 0,4535924277 кг  
Центнер, кратная единица СИ (q, ц); 1 ц = 100 кг  
Центнер (Великобрит.) (cwt, —); 1 центнер (Великобрит.) = 50,8023 кг  
Центнер короткий (Великобрит.) (sh. cwt, —); 1 центнер короткий = 45,3592 кг

## Плотность

Грамм на кубический дюйм (g/in<sup>3</sup>, —); 1 грамм на кубический дюйм = 61,0 кг/м<sup>3</sup>  
Грамм на кубический метр (—, г/м<sup>3</sup>); 1 г/м<sup>3</sup> =  $1 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>  
Грамм на кубический сантиметр (g/cm<sup>3</sup>, г/см<sup>3</sup>); 1 г/см<sup>3</sup> =  $1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  
Грамм на кубический фут (g/ft<sup>3</sup>, —); 1 грамм на кубический фут =  $3,53 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>  
Грамм на литр (g/l, г/л); 1 г/л = 1 кг/м<sup>3</sup>  
Унция на кубический дюйм (oz/in<sup>3</sup>, —); 1 унция на кубический дюйм =  $1,73 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>  
Унция на кубический сантиметр (oz/cm<sup>3</sup>, —); 1 унция на кубический сантиметр =  $2,835 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>  
Унция на кубический фут (—, —); 1 унция на кубический фут = 1,0014 кг/м<sup>3</sup>  
Фунт на кубический фут (lb/ft<sup>3</sup>, —); 1 фунт на кубический фут = 16,0185 кг/м<sup>3</sup>

## Линейная плотность

Текс (tex, текс); 1 текс =  $1 \cdot 10^{-6}$  кг/м (точно)

## Сила

Дина (din, дин); 1 дин =  $1 \cdot 10^{-5}$  Н  
Килограмм-сила (kgf, кгс); 1 кгс = 9,80665 Н (точно)  
Килопонд (kp, —); 1 килопонд = 9,80665 Н (точно)  
Паундаль (pdl, —); 1 паундаль = 0,138255 Н (точно)  
Понд (p, —); 1 понд =  $9,80665 \cdot 10^{-3}$  Н (точно)  
Сен (sp, си); 1 си =  $1 \cdot 10^3$  Н  
Тонна-сила (tf, тс); 1 тс =  $9,80665 \cdot 10^3$  Н (точно)  
Фунт-сила (lbf, —); 1 фунт-сила = 4,44822 Н

## Давление

Атмосфера техническая (at, ат); 1 ат =  $9,80665 \cdot 10^4$  Па (точно)  
Атмосфера физическая (atm, атм); 1 атм =  $1,01325 \cdot 10^5$  Па (точно)  
Бар (bar, бар); 1 бар =  $1 \cdot 10^5$  Па  
Дина на квадратный сантиметр (din/cm<sup>2</sup>, дин/см<sup>2</sup>); 1 дин/см<sup>2</sup> = 0,1 Па  
Дюйм водяного столба (in H<sub>2</sub>O, —); 1 дюйм вод. ст. = 249,089 Па  
Дюйм ртутного столба (in Hg, —); 1 дюйм рт. ст. = 3386,39 Па  
Килограмм-сила на квадратный метр (kgf/m<sup>2</sup>, кгс/м<sup>2</sup>); 1 кгс/м<sup>2</sup> = 9,80665 Па (точно)  
Килограмм-сила на квадратный сантиметр (kgf/cm<sup>2</sup>, кгс/см<sup>2</sup>); 1 кгс/см<sup>2</sup> =  $9,80665 \cdot 10^4$  Па (точно)  
Килопонд на квадратный сантиметр (kp/cm<sup>2</sup>, —); 1 килопонд на кв. см =  $9,80665 \cdot 10^4$  Па (точно)  
Миллиметр водяного столба (mm H<sub>2</sub>O, мм вод. ст.); 1 мм вод. ст. = 9,80665 Па (точно)  
Миллиметр ртутного столба (mm Hg, мм рт. ст.); 1 мм рт. ст. = 133,322 Па  
Пьеза (pz, пз); 1 пз =  $1 \cdot 10^3$  Па  
Тонна-сила на квадратный метр (tf/m<sup>2</sup>, тс/м<sup>2</sup>); 1 тс/м<sup>2</sup> =  $9,80665 \cdot 10^3$  Па (точно)  
Торр (Torr, —); 1 торр = 133,322 Па

Фунт-сила на квадратный дюйм ( $\text{lbf/in}^2$ , —); 1 фунт-сила на кв. дюйм =  $6,89476 \cdot 10^3$  Па  
Фут водяного столба ( $\text{ft H}_2\text{O}$ , —); 1 фут вод. ст. =  $2,98907 \cdot 10^3$  Па

### Импульс (количество движения)

Грамм-сантиметр в секунду ( $\text{g}\cdot\text{cm/s}$ ,  $\text{г}\cdot\text{см/с}$ ); 1  $\text{г}\cdot\text{см/с}$  =  $1 \cdot 10^{-5}$  кг·м/с  
Килограмм-сила-секунда ( $\text{kgf}\cdot\text{s}$ , кгс·с); 1 кгс·с =  $9,80665$  кг·м/с  
Тонна-метр в секунду (—, т·м/с); 1 т·м/с =  $1 \cdot 10^3$  кг·м/с

### Момент силы

Дина-сантиметр ( $\text{din}\cdot\text{cm}$ , дин·см); 1 дин·см =  $1 \cdot 10^{-7}$  Н·м  
Килограмм-сила-метр ( $\text{kgf}\cdot\text{m}$ , кгс·м); 1 кгс·м =  $9,80665$  Н·м (точно)  
Килопонд-метр ( $\text{kp}\cdot\text{m}$ ; —); 1 килопонд-метр =  $9,80665$  Н·м (точно)  
Фунт-сила-фут ( $\text{lbf}\cdot\text{ft}$ , —); 1 фунт-сила-фут =  $1,35582$  Н·м

### Момент импульса (момент количества движения)

Грамм-квадратный сантиметр на секунду ( $\text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\text{г}\cdot\text{см}^2/\text{с}$ ); 1  $\text{г}\cdot\text{см}^2/\text{с}$  =  $1 \cdot 10^{-7}$  кг·м<sup>2</sup>/с  
Килограмм-сила-метр-секунда ( $\text{kgf}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ , кгс·м·с); 1 кгс·м·с =  $9,80665$  кг·м<sup>2</sup>/с  
Тонна-метр в квадрате на секунду (—, т·м<sup>2</sup>/с); 1 т·м<sup>2</sup>/с =  $1 \cdot 10^3$  кг·м<sup>2</sup>/с

### Напряжение (механическое)

Килограмм-сила на квадратный миллиметр ( $\text{kgf/mm}^2$ , кгс/мм<sup>2</sup>); 1 кгс/мм<sup>2</sup> =  $9,80665 \cdot 10^6$  Па (точно)  
Килопонд на квадратный миллиметр ( $\text{kp/mm}^2$ , —); 1 килопонд на кв. мм =  $9,80665 \cdot 10^6$  Па (точно)

### Работа, энергия

Ватт-час ( $\text{W}\cdot\text{h}$ , Вт·ч); 1 Вт·ч =  $3600$  Дж  
Киловатт-час ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ , кВт·ч); 1 кВт·ч =  $3,6 \cdot 10^6$  Дж  
Килограмм-сила-метр ( $\text{kgf}\cdot\text{m}$ , кгс·м); 1 кгс·м =  $9,80665$  Дж  
Килопонд-метр ( $\text{kp}\cdot\text{m}$ , —); 1 килопонд-метр =  $9,80665$  Дж  
Литр-атмосфера (—, л·атм); 1 л·атм =  $101,328$  Дж  
Лошадиная сила-час (—, л.с.ч); 1 л.с.ч =  $2,64780 \cdot 10^6$  Дж  
Фунт-сила-фут ( $\text{lbf}\cdot\text{ft}$ , —); 1 фунт-сила-фут =  $1,35582$  Дж  
Эрг ( $\text{erg}$ , эрг); 1 эрг =  $1 \cdot 10^{-7}$  Дж

### Мощность

Калория в секунду ( $\text{cal/s}$ , кал/с); 1 кал/с =  $4,1868$  Вт  
Килограмм-сила-метр в секунду ( $\text{kgf}\cdot\text{m/s}$ , кгс·м/с); 1 кгс·м/с =  $9,80665$  Вт  
Лошадиная сила (—, л.с.); 1 л.с. =  $735,499$  Вт  
Лошадиная сила (Великобрит.) ( $\text{hp}$ , —); 1 лошадиная сила (Великобрит.) =  $745,700$  Вт  
Эрг в секунду ( $\text{erg/s}$ , эрг/с); 1 эрг/с =  $1 \cdot 10^{-7}$  Вт

### Динамическая вязкость

Килограмм-сила-секунда на квадратный метр ( $\text{kgf}\cdot\text{s/m}^2$ , кгс·с/м<sup>2</sup>); 1 кгс·с/м<sup>2</sup> =  $9,80665$  Па·с  
Паундаль-секунда на квадратный фут ( $\text{pdl}\cdot\text{s/ft}^2$ , —); 1 паундаль-секунда на кв. фут =  $1,48816$  Па·с  
Пуаз (P, П); 1 П =  $0,1$  Па·с

Фунт-сила-секунда на квадратный метр ( $\text{lbf}\cdot\text{s/m}^2$ , —); 1 фунт-сила-секунда на кв. метр =  $47,8803$  Па·с

### Кинематическая вязкость

Квадратный метр на час ( $\text{m}^2/\text{h}$ , м<sup>2</sup>/ч); 1 м<sup>2</sup>/ч =  $2,77 (7) \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с  
Квадратный фут на секунду ( $\text{ft}^2/\text{s}$ , —); 1 кв. фут на секунду =  $0,0929030$  м<sup>2</sup>/с  
Квадратный фут на час ( $\text{ft}^2/\text{h}$ , —); 1 кв. фут на час =  $2,58064 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с  
Стокс (St, Ст); 1 Ст =  $1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с

### Объемный расход

Кубический дюйм в секунду ( $\text{in}^3/\text{s}$ , —); 1 куб. дюйм в секунду =  $1,6387 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с  
Кубический сантиметр в секунду ( $\text{cm}^3/\text{s}$ , см<sup>3</sup>/с); 1 см<sup>3</sup>/с =  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с  
Кубический фут в секунду ( $\text{ft}^3/\text{s}$ , —); 1 кубический фут в секунду =  $0,0283168$  м<sup>3</sup>/с  
Литр в минуту ( $\text{l/min}$ , л/мин); 1 л/мин =  $1,66(6) \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с  
Литр в час ( $\text{l/h}$ , л/ч); 1 л/ч =  $2,77(7) \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/с

### Количество теплоты (теплота)

Британская тепловая единица (Btu, —); 1 британская тепловая единица =  $1,05506 \cdot 10^3$  Дж  
Калории международная (cal. кал); 1 кал =  $4,1868$  Дж (точно)  
Калория пятнадцатиградусная ( $\text{cal}_{15}$ , кал<sub>15</sub>); 1 кал<sub>15</sub> =  $4,1855$  Дж  
Калория термодинамическая ( $\text{cal}_t$ , кал<sub>тх</sub>); 1 кал<sub>тх</sub> =  $4,1840$  Дж  
Термия (th, —); 1 термия =  $4,1868 \cdot 10^3$  Дж

### Удельная теплоемкость

Калория на грамм-градус Цельсия [ $\text{cal}/(\text{г}\cdot^\circ\text{C})$ , кал/(г·°C)]; 1 кал/(г·°C) =  $4,1868 \cdot 10^3$  Дж/(кг·K)  
Килокалория на килограмм-градус Цельсия [ $\text{kcal}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ , ккал/(кг·°C)]; 1 ккал/(кг·°C) =  $4,1868 \cdot 10^3$  Дж/(кг·K)

### Молярная теплоемкость

Калория на моль-градус Цельсия [ $\text{cal}/(\text{моль}\cdot^\circ\text{C})$ , кал/(моль·°C)]; 1 кал/моль·°C =  $4,1868$  Дж/(моль·K)

### Теплопроводность (коэффициент теплопроводности)

Британская тепловая единица в секунду-фут-градус Фаренгейта [ $\text{Btu}/(\text{s}\cdot\text{ft}\cdot\text{deg F})$ , —]; 1 британская тепловая единица в секунду-фут-градус Фаренгейта =  $6,23064 \cdot 10^3$  Вт/(м·K)  
Калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия [ $\text{cal}/(\text{с}\cdot\text{см}\cdot^\circ\text{C})$ , кал/(с·см·°C)]; 1 кал/(с·см·°C) =  $418,7$  Вт/(м·K)  
Килокалория в час на метр-градус Цельсия [ $\text{kcal}/(\text{h}\cdot\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , ккал/(ч·м·°C)]; 1 ккал/(ч·м·°C) =  $1,163$  Вт/(м·K)  
Эрг в секунду на сантиметр-Кельвин [ $\text{erg}/(\text{с}\cdot\text{м}\cdot\text{K})$ , эрг/(с·см·K)]; 1 эрг/(с·см·K) =  $1 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·K)

### Электрический заряд

Фарадей (F, Ф); 1 Ф =  $96484,56$  Кл  
Фрайклин (Fr, Фр); 1 Фр =  $3,33564 \cdot 10^{-10}$  Кл

## Напряженность электрического поля

Вольт на сантиметр (V/cm, В/см); 1 В/см=100 В/м

## Электрический момент

Дебай (D, D); 1 D=3,33564·10<sup>-30</sup> Кл·м

## Плотность тока

Ампер на квадратный миллиметр (A/mm<sup>2</sup>, А/мм<sup>2</sup>);  
1 А/мм<sup>2</sup>=1·10<sup>6</sup> А/м<sup>2</sup>

## Удельное электрическое сопротивление

Ом-квадратный миллиметр на метр (Ω·mm<sup>2</sup>/m, Ом×  
×мм<sup>2</sup>/м); 1 Ом·мм<sup>2</sup>/м=1·10<sup>-6</sup> Ом·м  
Ом-сантиметр (Ω·см, Ом·см); 1 Ом·см=0,01 Ом·м

## Удельная электрическая проводимость

Ом в минус первой степени-сантиметр в минус первой  
степени (Ω<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>, Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>); 1 Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>=  
=100 См/м  
Метр на ом-квадратный миллиметр [m/(Ω·mm<sup>2</sup>),  
м/(Ом·мм<sup>2</sup>)]; 1 м/(Ом·мм<sup>2</sup>)=1·10<sup>6</sup> См/м

## Магнитная индукция

Гаусс (Gs, Гс); 1 Гс=1·10<sup>-4</sup> Тл  
Вебер на квадратный сантиметр (Wb/cm<sup>2</sup>, Вб/см<sup>2</sup>);  
1 Вб/см<sup>2</sup>=1·10<sup>4</sup> Тл

## Магнитный поток

Максвелл (Mx, Мкс); 1 Мкс=1·10<sup>-8</sup> Вб

## Напряженность магнитного поля

Эрстед (Oe, Э); 1 Э=79,5775 А/м  
Ампер на сантиметр (A/cm, А/см); 1 А/см=100 А/м  
Ампер-виток на сантиметр (—, Ав/см); 1 Ав/см=100 А/м

## Магнитодвижущая сила

Гильберт (Gb, Гб); 1 Гб=0,795775 А  
Ампер-виток (—, Ав): 1 Ав=1 А

## Магнитный момент

Магнетон Бора (μ<sub>B</sub>, μ<sub>B</sub>); 1 μ<sub>B</sub>=9,274078·10<sup>-24</sup> А·м<sup>2</sup>

## Яркость

Апостильб (asb, асб); 1 асб=0,318310 кд/м<sup>2</sup>  
Ламберт (Lb, Лб); 1 Лб=0,318310·10<sup>4</sup> кд/м<sup>2</sup>  
Стильб (sb, сб); 1 сб=1·10<sup>4</sup> кд/м<sup>2</sup>

## Поглощенная доза

Рад (rad, рад); 1 рад=0,01 Гр

## Эквивалентная доза

Бэр (rem, бэр); 1 бэр=0,01 Дж/кг

## Активность нуклида в радиоактивном источнике

Кюри (Ci, Ки); 1 Ки=3,700·10<sup>10</sup> Бк (точно)

## Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений

Рентген (R, Р); 1 Р=2,58·10<sup>-4</sup> Кл/кг (точно)

## 1.14. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

На внутренней стороне обложки справочника приведены значения фундаментальных физических постоянных и некоторые соотношения между различными единицами, которые рекомендованы рабочей группой международного Комитета по константам для науки и технологии (COD ATA)\* в 1986 г. [15].

Новый список самосогласованных фундаментальных постоянных отличается от рекомендованных Государственной службой стандартных справочных данных Государственного комитета стандартов при СМ СССР [18] тем, что в него включены два типа констант: стохастические, как обычно, и точные. К точным константам отнесена, например, скорость света в вакууме  $c=299\,792\,458$  м/с, значение которой следует из нового определения метра [20]. В список включены уточненное значение гравитационной постоянной  $G=6,672\,59(85) \times 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>·кг<sup>-2</sup> [19], оцененные значения масс [16, 17] и некоторые другие постоянные.

При составлении таблиц использовались также ГОСТ 8.417—81 Единицы физических величин, Документ UIP-20-1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике [21] и другие пособия [14, 15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. М.: Изд-во стандартов, 1980.
2. ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78) ГСИ: Единицы физических величин.
3. ГОСТ 15484—81. Излучения ионизирующие и их измерения: Термины и определения.
4. РД 50—160—79. Методические указания: Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78: Метрология. Единицы физических величин.
5. РД 50—454—84. Методические указания: Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81: ГСИ. Единицы физических величин в области ионизирующих излучений.
6. Иванов В. И., Машкович В. П., Центр Э. М. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике. М.: Энергоиздат, 1981.
7. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1977.
8. Чертов А. Г. Единицы физических величин. М.: Высшая школа, 1977.
9. Широков К. П., Богуславский М. Г. Международная система единиц. М.: Изд-во стандартов, 1984.
10. Фундаментальные физические константы: ГСССД 1—76/Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1976.
11. Luther G. G., Towler W. R.//Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48. № 3. P. 121—123.
12. Petty B. W.//Nature. 1983. Vol. 303. № 5916. P. 373—376.
13. Документ UIP—20—1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике//Успехи физ. наук. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 289—338.



14. Физический энциклопедический словарь/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1984.
15. Cohen E. R., Taylor B. N. The 1986 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1987. vol. 92. № 2. P. 85—95.
16. Reviews of particle properties//Rev. Mod. Phys 1984. Vol. 56. № 2. Pt. II. P. S2—S304.
17. Wapstra A. H., Audi G. The 1983 Atomic Mass Evaluation. 1985. A432. № 1. P. 1—362.

18. Фундаментальные физические константы: ГСССД 1—76/Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1976.
19. Luther G. G., Towler W. R. Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48, No 3. P. 121—123.
20. Petley B. W. Nature, 1983. Vol. 303. No 5916. P. 373—376.
21. Документ UIP-20-1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике. УФН. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 289—338.

## ГЛАВА 2

# СИММЕТРИЙНОЕ И ТЕНЗОРНОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ

Ю. В. Писаревский

### 2.1. СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ [1, 2]

Термодинамически равновесное состояние твердого тела — кристаллическое. Кристаллы — тела, обладающие упорядоченной трехмерно-периодической пространственной атомной структурой. Множество природных и синтетических твердых веществ (металлы, сплавы, минералы и др.) состоят из очень мелких произвольно ориентированных кристалликов. Если мелкие кристаллы ориентированы хаотически, их называют *поликристаллами*. При преимущественной ориентации кристалликов твердое тело образует *текстуру*. В последнее время резко возросли масштабы получения и применения отдельных крупных кристаллов, которые часто называют *монокристаллами*.

Свойства кристаллов определяются особенностями строящих кристаллическую решетку атомов и молекул, силами связей и взаимным расположением в пространстве — *структурой кристаллов*.

Очень часто кристаллическая решетка имеет различные элементы симметрии, соответствующие определенным операциям в трехмерном пространстве. Выполнение этих операций в кристалле оставляет решетку неизменной. Между симметрией кристаллической решетки и симметрией тех или иных свойств существует четкая взаимосвязь. Важно учитывать, что относительно различных свойств и в зависимости от уровня рассмотрения — микроскопического или макроскопического, в статике или динамике симметрия объекта может изменяться и по-разному описываться. При этом в каждом случае будет определенная иерархия групп симметрии (отличающихся совокупностью элементов симметрии).

Идеальные кристаллы характеризуются свойствами однородности и анизотропии. Однородность определяет неизменность свойств при перемещении точки измерения на расстояние, кратное периодам решетки. Анизотропия — зависимость свойств от направления. Она зависит от группы симметрии. Принимая среду однородной, пренебрегают влиянием дефектов решетки: блоков, дислокаций и т. п. В сравнительно сложных соединениях от точки к точке в той или иной степени изменяется стехиометрия (т. е. локальный химический состав кристалла). Например, в кристалле ниобата лития соотношение между оксидами лития и ниобия может изменяться иногда даже от 0,9 до 1,1. От дефектов и состава зависят также свойства кристаллов, но так как эта зависимость сравнительно слабая, приведенные свойства приписываются однородному кристаллу с идеализированным составом.

Основным свойством пространственной кристаллической решетки является трехмерная периодичность, когда можно выделить три некопланарных вектора *a*, *b*, *c*, любая линейная комбинация которых переводит точку решетки в эквивалентную ей, т. е. вектор  $\mathbf{M} = A\mathbf{a} + B\mathbf{b} + C\mathbf{c}$ , где *A*, *B*, *C* — любые целые числа, переводит точку решетки в эквивалентную. Эту операцию называют *трансляцией*. Параллелепипед, построенный на векторах *a*, *b*, *c*, называют *параллелепипедом повторяемости* или *элементарной ячейкой*. Помимо трансляций в большом числе кристаллических решеток имеются и некоторые элементы симметрии.

**Поворотные оси.** Поворот на угол  $\alpha = 2\pi/N$ , который переводит любой элемент кристаллической решетки в эквивалентное состояние, определяет наличие оси симметрии. Эти оси обозначают *N*, значение которой определяет порядок оси. В кристаллах возможны поворотные оси 1, 2, 3, 4, 6-го порядков. Операция *I* соответствует повороту на  $2\pi$ .

**Плоскость зеркального отражения (плоскость симметрии).** Соответствующую операцию обозначают буквой *m* (от слова *mirror* — зеркало) или символом  $\bar{2}$ , так как эта операция представляет собой и инверсионный поворот второго порядка.

**Инверсионно-поворотные оси.** Обозначаются цифрой, отвечающей порядку поворота, с чертой сверху:  $\bar{1}$ ,  $\bar{2}$ ,  $\bar{3}$ ,  $\bar{4}$ ,  $\bar{6}$ . Важнейший частный случай — ось  $\bar{1}$  — центр симметрии.

**Зеркально-поворотные оси.** Совпадают с инверсионно-поворотными осями, но с элементарным углом поворота, отличающимся от них на  $\pi$ . Зеркально-поворотные оси обозначают цифрой, отвечающей порядку поворота, со знаком тильды ( $\sim$ ) наверху:  $\tilde{1}$ ,  $\tilde{2}$ ,  $\tilde{3}$ ,  $\tilde{4}$ ,  $\tilde{6}$ . Инверсионные и зеркально-поворотные оси связаны так:

$$\tilde{N}_\alpha = \bar{N}_{\alpha-\pi} \text{ или } \tilde{1} = \bar{2} = m; \quad \tilde{3} = \bar{6}; \quad \tilde{4} = \bar{4}; \quad \tilde{6} = \bar{3}; \\ \tilde{1} = \bar{2}.$$

**Винтовые оси.** Эти оси имеют угловую и трансляционную компоненты:

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{N}, \quad N = 2, 3, 4, 6;$$

$$t_s = \frac{q}{N} t, \quad q = 1, 2, 3, 4, 5.$$

Операция означает, что вместе с поворотом вокруг данной оси осуществляется трансляция вдоль этой же оси. Общий символ винтовых осей —  $N_q$ .

**Плоскости скользящего отражения.** Операция подразумевает отражение относительно данной плоскости с одновременной трансляцией вдоль одного из направлений, лежащих в плоскости. Так как двукратное повторение данной операции сводится просто к удвоенному переносу вдоль направления скольжения, то удвоенная трансляционная компонента совпадает с одним из периодов решетки.

Такие операции обозначают  $a$ ,  $b$  или  $c$  соответственно наименованию той оси элементарной ячейки, вдоль которой происходит скольжение. Так, для операции  $a$  трансляционная компонента  $a_1$  равна  $a/2$ , где  $a$  — период решетки (один из характерных размеров элементарной ячейки). В общем случае возможны операции скользящего отражения и вдоль диагоналей граней или вдоль пространственной диагонали элементарной ячейки

$$t' = (b + c)/2; \quad t' = (c \pm a)/4; \quad t' = (a \pm b \pm c)/4.$$

**Полярность.** Одной из важнейших характеристик направлений может быть равнозначность их противоположных сторон. Если прямая преобразуется в себя какой-либо операцией, меняющей местами противоположные направления этой прямой, то она неполярна. К элементам, соответствующим таким операциям, относится центр симметрии, ось четного порядка или плоскость симметрии (последние две операции — в случае перпендикулярности указанных элементов данной прямой).

Если указанных операций нет, то направление полярно. В кристаллах только для полярных направлений может наблюдаться полярность свойств.

**Сингонии.** Кристаллические решетки классифицируются по наличию в них различных элементов симметрии. Прежде всего их можно разделить на семь типов по форме параллелепипедов повторяемости (элементарной ячейки). Эти типы называют сингониями: триклинной, моноклинной, ромбической, тригональной, тетрагональной, гексагональной и кубической.

**Решетки Браве.** Элементарные ячейки различаются не только сингонией, но и возможным расположением узлов в центре граней или объема параллелепипеда повторяемости. Таким образом получается 14 решеток Браве. В некоторых из них нет дополнительных узлов — такие решетки называют *примитивными* —  $P$ . Другие относятся к гранецентрированным  $A$ ,  $B$  или  $C$  ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  — грани параллелепипеда повторяемости). Центрировку по всем граням одновременно обозначают символом  $F$ , а центрировку по объему —  $I$ .

## Точечные группы. Кристаллографические классы

При изучении макроскопических физических свойств представляет интерес не относительное положение элементов структуры, а только их ориентация. Поэтому для описания макроскопических свойств, когда кристалл можно представить в виде сплошной среды, нужно знать все комбинации элементов симметрии, отличающиеся набором и взаимной ориентацией этих элементов.

Таблица 2.1. Решетки Браве

| Сингония и параметры ячейки                                                                    | Тип ячейки (центрированность)                                               | Обозначения   |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                                                                                                |                                                                             | по Шен-флису  | международные |
| Триклинная,<br>$a \neq b \neq c$ ;<br>$\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$               | Примитивная $P$                                                             | $\Gamma_t$    | $P \bar{1}$   |
| Моноклинная,<br>$a \neq b \neq c$ ;<br>$\alpha = \gamma = 90^\circ$ ;<br>$\beta \neq 90^\circ$ | Примитивная $P$                                                             | $\Gamma_m$    | $P 2/m$       |
|                                                                                                | Гранецентрированная $B (C)$                                                 | $\Gamma_m^b$  | $B (C) 2/m$   |
| Ромбическая,<br>$a \neq b \neq c$ ;<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                    | Примитивная $P$                                                             | $\Gamma_0$    | $Pmmm$        |
|                                                                                                | Гранецентрированная $C (A, B)$                                              | $\Gamma_0^c$  | $C (B, A)mmm$ |
|                                                                                                | Центрированная по всем граням $F$                                           | $\Gamma_0^f$  | $Fmmm$        |
|                                                                                                | Объемноцентрированная $I$                                                   | $\Gamma_0^v$  | $Immm$        |
| Тригональная,<br>$a = b \neq c$ ;<br>$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$                   | Примитивная $P (R)$                                                         | $\Gamma_{rh}$ | $R \bar{3}m$  |
|                                                                                                | Тетрагональная,<br>$a = b \neq c$ ;<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ | $\Gamma_q$    | $P 4/mmm$     |
| Гексагональная,<br>$\gamma = 120^\circ$ ;<br>$a = b \neq c$ ;<br>$\alpha = \beta = 90^\circ$   | Объемноцентрированная $I$                                                   | $\Gamma_q^v$  | $I 4/mmm$     |
|                                                                                                | Примитивная $P$                                                             | $\Gamma_h$    | $P 6/mmm$     |
| Кубическая,<br>$a = b = c$ ;<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$                           | Примитивная $P$                                                             | $\Gamma_c$    | $Pm \bar{3}m$ |
|                                                                                                | Центрированная по всем граням $F$                                           | $\Gamma_c^v$  | $Fm \bar{3}m$ |
|                                                                                                | Объемноцентрированная $I$                                                   | $\Gamma_c^f$  | $Im \bar{3}m$ |

При этом не принимаются во внимание относительное положение элементов структуры, а также трансляции, связанные с плоскостями скольжения и винтовыми осями, т. е. учитываются только следующие элементы симметрии: а) центр симметрии  $\bar{1}$ ; б) зеркальная плоскость  $m$ ; в) поворотные оси первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков; г) инверсионные оси первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков.

Возможны 32 различные комбинации вышеуказанных элементов симметрии — 32 точечные группы. Они соответствуют 32 кристаллографическим классам. Эти классы объединяются в семь кристаллографических групп по сингониям:

1. Триклинная сингония — имеются только оси первого порядка (поворотные или инверсионные).
2. Моноклинная сингония — имеется только одна ось второго порядка (поворотная или инверсионная) или только одна зеркальная плоскость.
3. Ромбическая сингония — имеются три взаимно перпендикулярные оси второго порядка (поворотные или инверсионные), зеркальные плоскости, но нет осей более высокого порядка.
4. Тригональная сингония — имеется одна ось третьего порядка (поворотная или инверсионная).

Таблица 2.2. Обозначения и названия 32 точечных групп (классов) симметрии

| Синония        | Обозначение   |                     |                | Формула симметрии   | Название класса                 |
|----------------|---------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------------------------|
|                | международное | по Шубникову        | по Шенфлису    |                     |                                 |
| Триклинная     | 1             | 1                   | $C_1$          | $L^1$               | Моноклинный                     |
|                | $\bar{1}$     | $\bar{2}$           | $C_i = S_2$    | $C$                 | Пинакондальный                  |
| Моноклинная    | 2             | 2                   | $C_2$          | $L^2$               | Диздрический осевой             |
|                | $m$           | $m$                 | $C_{1h} = C_S$ | $P$                 | Диздрический безосный           |
|                | $2/m$         | $2:m$               | $C_{2h}$       | $L^2PC$             | Призматический                  |
| Ромбическая    | 222           | 2:2                 | $D_2 = V$      | $3L^2$              | Ромбо-тетраэдрический           |
|                | $mm^2$        | $2 \cdot m$         | $C_{2v}$       | $L^22P$             | Ромбо-пирамидальный             |
|                | $mmm$         | $m \cdot 2 \cdot m$ | $D_{2h}$       | $3L^23PC$           | Ромбо-дипирамидальный           |
| Тригональная   | 3             | 3                   | $C_3$          | 3                   | Тригонально-пирамидальный       |
|                | 32            | 3:2                 | $D_3$          | $L^33L^2$           | Тригонально-трапецоэдрический   |
|                | $3m$          | $3 \cdot m$         | $C_{3v}$       | $L^33P$             | Дитригонально-пирамидальный     |
|                | $\bar{3}$     | $\bar{6}$           | $C_{3i} = S_6$ | $L^36C$             | Ромбоэдрический                 |
|                | $\bar{3}m$    | $\bar{6}m$          | $D_{3d}$       | $L^33L^23PC$        | Дитригонально-скеленоэдрический |
|                | 4             | 4                   | $C_4$          | $L^4$               | Тетрагонально-пирамидальный     |
| Тетрагональная | 422           | 4:2                 | $D_4$          | $L^4L^2$            | Тетрагонально-трапецоэдрический |
|                | $4/m$         | $4:m$               | $C_{4h}$       | $L^4PC$             | Тетрагонально-дипирамидальный   |
|                | $4mm$         | $4 \cdot m$         | $C_{4v}$       | $L^44P$             | Дитетрагонально-пирамидальный   |
|                | $4/mmm$       | $m \cdot 4:m$       | $D_{4h}$       | $L^44L^25PC$        | Дитетрагонально-дипирамидальный |
|                | $\bar{4}$     | $\bar{4}$           | $S_4$          | $L_4^2$             | Тетрагонально-тетраэдрический   |
|                | $\bar{4}2m$   | $\bar{4} \cdot m$   | $D_{2d} = V_d$ | $L_4^22L^22P$       | Тетрагонально-скеленоэдрический |
|                | $\bar{6}$     | $3:m$               | $C_{3h}$       | $L^3P$              | Тригонально-дипирамидальный     |
| Гексагональная | $\bar{6}m2$   | $m \cdot 3:m$       | $D_{3h}$       | $L^33L^24P$         | Дитригонально-дипирамидальный   |
|                | 6             | 6                   | $C_6$          | $L^6$               | Гексагонально-пирамидальный     |
|                | 622           | 6:2                 | $D_6$          | $L^66L^2$           | Гексагонально-трапецоэдрический |
|                | $6/m$         | $6:m$               | $C_{6h}$       | $L^6PC$             | Гексагонально-дипирамидальный   |
|                | $6mm$         | $6 \cdot m$         | $C_{6v}$       | $L^66P$             | Дигексагонально-пирамидальный   |
|                | $6/mmm$       | $m \cdot 6:m$       | $D_{6h}$       | $L^66L^27PC$        | Дигексагонально-дипирамидальный |
| Кубическая     | 23            | $3/2$               | $T$            | $3L^24L^3$          | Тритетраэдрический              |
|                | $m\bar{3}$    | $\bar{6}/2$         | $T_h$          | $3L^24L_6^33PC$     | Дидодекаэдрический              |
|                | $\bar{4}3m$   | $3/\bar{4}$         | $T_d$          | $3L_4^24L^36P$      | Гексатетраэдрический            |
|                | 432           | $3/4$               | $O$            | $3L^44L^36L^2$      | Триоктаэдрический               |
|                | $m\bar{3}m$   | $\bar{6}/4$         | $O_h$          | $3L^44L_6^36L^29PC$ | Гексоктаэдрический              |

Примечание. В международной и шубниковской системах обозначений приведены элементы симметрии, из которых можно вывести остальные. В графе «Формула симметрии» приведены все элементы симметрии данного класса:  $L$  — ось,  $C$  — центр,  $P$  — плоскость симметрии; перед каждым символом стоит число соответствующих элементов.

5. Тетрагональная сингония — имеется одна ось четвертого порядка (поворотная или инверсионная).

6. Гексагональная сингония — имеется одна ось шестого порядка (поворотная или инверсионная).

7. Кубическая сингония — имеются четыре оси третьего порядка, расположенные параллельно объемным диагоналям куба

## Пространственные группы симметрии

Пространственные группы — это бесконечные группы, образуемые комбинацией решеток Браве с операциями симметрии точечных групп, а также с плоскостями

ми отражения и винтовыми осями. Всего для 32 классов точечной симметрии существуют 230 пространственных групп симметрии. В качестве примера в табл. 2.3 приведены пространственные группы, соответствующие точечной группе  $C_{2v}$ . Обозначение пространственных групп по Шенфлюсу является просто обозначением точечной группы с установленным порядковым номером пространственной группы внутри класса.

В международные обозначения входят символ решетки Браве и операции (элементы) симметрии в определенном трехпозиционном порядке в соответствии с символом точечной группы и выбором кристаллографических осей  $X, Y, Z$  (о выборе осей см. ниже).

Таблица 2.3. Пространственные группы для класса  $C_{2v}$

| Решетка Браве                            | Простые группы              | Группы с плоскостями скользящего отражения                                                                                          | Группы с винтовыми осями                                                                                     |
|------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P$ (примитивная)                        | $C_{2v}^1 - Pmm\ 2$         | $C_{2v}^3 - Pcc\ 2\ (2); C_{2v}^4 - Pma\ 2\ (2)$<br>$C_{2v}^6 - Pnc\ 2\ (4); C_{2v}^8 - Pba\ 2\ (4)$<br>$C_{2v}^{10} - Pnn\ 2\ (8)$ | $C_{2v}^2 - Pmc\ 2_1\ (2); C_{2v}^5 - Pca\ 2_1\ (4)$<br>$C_{2v}^7 - Pmn\ 2_1\ (4); C_{2v}^9 - Pna\ 2_1\ (8)$ |
| $C$ (гранецентрированная)                | $C_{2v}^{13} - Ccc\ 2\ (2)$ | $C_{2v}^{13} - Ccc\ 2\ (2)$                                                                                                         | $C_{2v}^{12} - Cmc\ 2_1\ (2)$                                                                                |
| $A$ (гранецентрированная)                | $C_{2v}^{14} - Amm\ 2$      | $C_{2v}^{15} - Abm\ 2\ (4); C_{2v}^{16} - Ama\ 2\ (2)$<br>$C_{2v}^{17} - Aba\ 2\ (4)$                                               | —                                                                                                            |
| $F$ (гранецентрированная по трем граням) | $C_2^{18} - Fmm\ 2$         | $C_{2v}^{19} - Fdd\ 2\ (8)$                                                                                                         | —                                                                                                            |
| $I$ (объемноцентрированная)              | $C_{2v}^{20} - Imm\ 2$      | $C_{2v}^{21} - Iba\ 2\ (8); C_{2v}^{22} - Ima\ 2\ (8)$                                                                              | —                                                                                                            |

Примечание.  $m$  и  $n$  — плоскости симметрии;  $a, b, c$  — плоскости скользящего отражения;  $2_1$  — винтовые оси. Цифры в скобках указывают, во сколько раз следует увеличить объем элементарной ячейки простой группы, чтобы получить указанную группу.

## Магнитная симметрия [4]

Для магнитных материалов находящиеся в эквивалентных кристаллографических позициях атомы могут иметь различно ориентированный в пространстве магнитный момент. На рис. 2.1 схематически показаны различные виды неколлинеарных магнитных структур.

Для учета ориентации магнитного момента в магнитной симметрии к описанным выше элементам симметрии добавляют  $R$ -преобразование, изменяющее направление магнитного момента атома или группы атомов на противоположное.

В отношении симметрии данная ситуация описывается шубниковскими группами антисимметрии (чернобелой симметрии, см. табл. 2.4).

В группу  $GI'$  входят кристаллы, у которых среднее по времени значение плотности магнитного момента равно нулю (диамагнетики и парамагнетики). Остальные 90 классов имеют магнитную структуру. Среди них 32 класса (группа  $G$ ) не содержат операций  $R$  — это полярные (одноцветные) классы. В качестве примера тип структур для этих классов показан на рис. 2.1, а и б. Оставшиеся 58 классов (группа  $G'$ ) содержат операцию  $R$  в сочетании с другими операциями симметрии.

Таблица 2.4. Соотношение между группами антисимметрии и магнитной симметрии

| $G$ — полярные (одноцветные) | $G'$ — смешанной полярности (двухцветные) | $GI'$ — нейтральные (серые) | Всего классов |
|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|---------------|
| $13 + 19 = 32$<br>(230)      | $18 + 40 = 58$<br>(1191)                  | 32 (230)                    | 122 (1651)    |

Примечание. Снизу подчеркнуто количество классов, допускающих спонтанную намагниченность  $I_s$ . В скобках приведено число соответствующих пространственных групп.

В табл. 2.5 приведены магнитные классы симметрии. Видно, что 31 класс допускает спонтанную намагниченность. Кристаллы, относящиеся к этим классам, являются ферро- или ферримagnetиками. К остальным 59 классам принадлежат антиферромагнитные кристаллы.

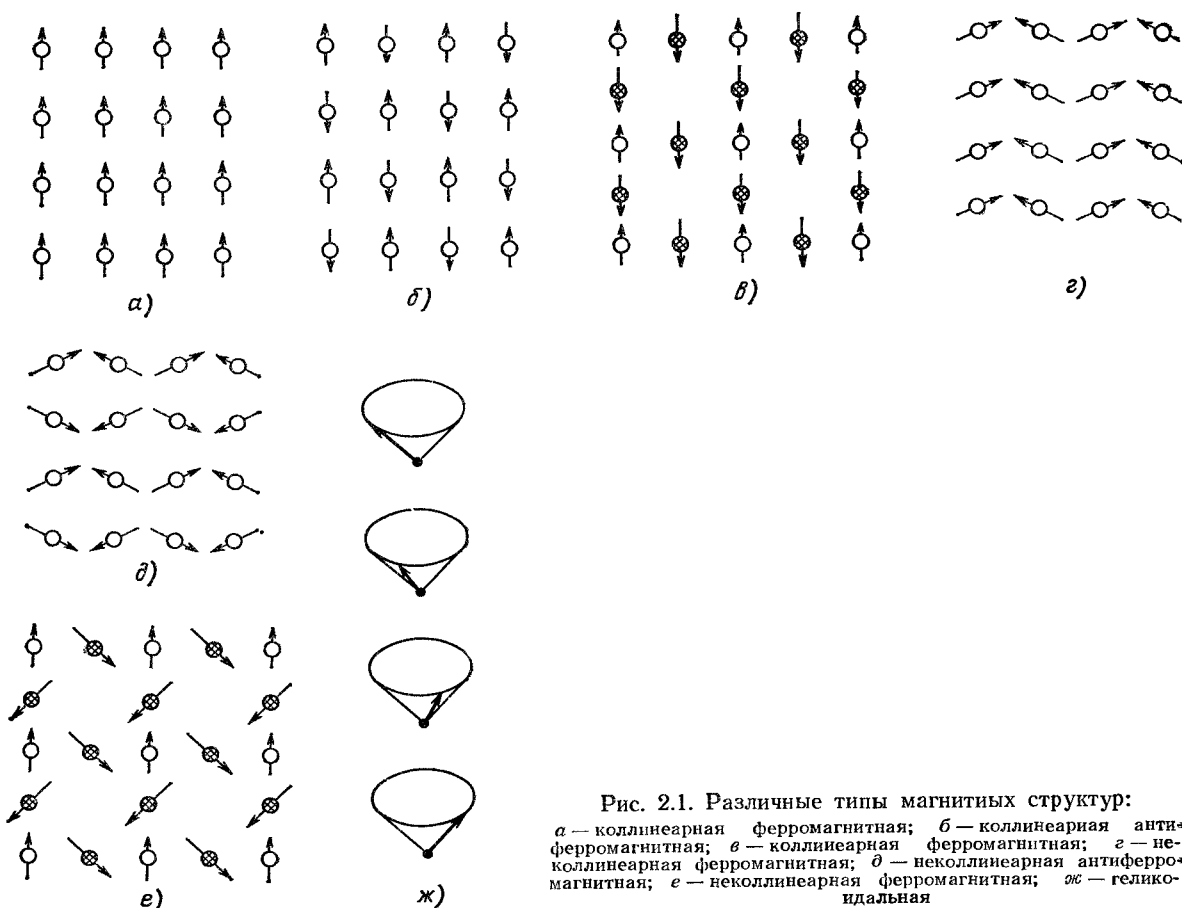


Рис. 2.1. Различные типы магнитных структур:  
 а — коллинеарная ферромагнитная; б — коллинеарная антиферромагнитная; в — коллинеарная ферромагнитная; г — неколлинеарная ферромагнитная; д — неколлинеарная антиферромагнитная; е — неколлинеарная ферромагнитная; ж — геликоидальная

Таблица 2.5. Магнитные классы симметрии

| Сингония       | Группа $G'$                                                                                                                                                                                       | Группа $G$                                                                        |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Триклинная     | $\bar{1}$                                                                                                                                                                                         | $1, \bar{1}$                                                                      |
| Моноклинная    | $\underline{2}', \underline{m}, 2'/\underline{m}', 2/m', 2'/m$                                                                                                                                    | $\underline{2}, \underline{m}, \underline{2}/\underline{m}$                       |
| Тетрагональная | $4', \bar{4}', 4'/m, 4/m', 4'22, \underline{42'2}, 4'mm', \underline{4m'm'}, \bar{4}'2m', \bar{4}'2'm, \underline{42'm'}, 4'/m'mm, \underline{4/mm'm'}, 4/m'm'm', 4/m'mm, 4'/m'mm'$               | $\underline{4}, \bar{4}, \underline{4}/\underline{m}, 422, 4mm, \bar{4}2m, 4/mmm$ |
| Тригональная   | $\bar{3}', \underline{32'}, \underline{3m'}, \bar{3}m', \bar{3}'m', \bar{3}'m$                                                                                                                    | $\underline{3}, \bar{3}, 32, 3m, \bar{3}m$                                        |
| Гексагональная | $6', \bar{6}', 6'/m', 6/m', 6'/m, 6'22', \underline{62'2'}, 6'mm', \underline{6m'm'}, \bar{6}'m'2, \bar{6}'m'2', \underline{\bar{6}'m'2'}, 6'/m'mm', \underline{6/mm'm'}, 6/mmm, 6/m'mm, 6'/mmm'$ | $\underline{6}, \bar{6}, \underline{6}/\underline{m}, 622, 6mm, 6m2, 6/mmm$       |
| Кубическая     | $m'3, 4'32, \bar{4}'3m', m3m', m'3m', m'3m$                                                                                                                                                       | $23, m\bar{3}, 432, \bar{4}3m, m3m$                                               |

Примечание. Элементы симметрии, содержащие операцию  $R$ , отмечены штрихом. Классы, допускающие спонтанную намагниченность, подчеркнуты.

## Предельные группы

Есть класс веществ, где наблюдается частичная упорядоченность. К нему относятся, в частности, текстуры.

В качестве примера таких веществ можно назвать древесину, пьезоэлектрические керамики и др. Симметричные свойства таких сред описывают с помощью предельных (непрерывных) точечных групп симметрии, которые содержат операции бесконечно малых поворотов, т.е. оси симметрии бесконечного порядка ( $\infty$ ). Таких групп семь:  $\infty$ ,  $\infty mm$ ,  $\infty 22$ ,  $\infty/m$ ,  $\infty/mmm$ ,  $\infty/\infty$ ,  $\infty/\infty mm$ .

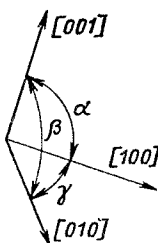
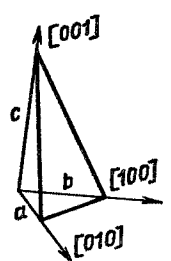
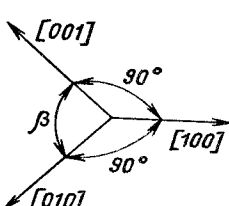
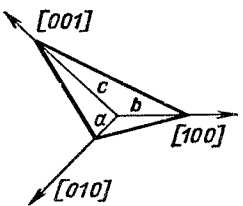
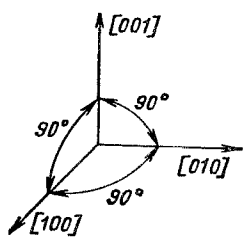
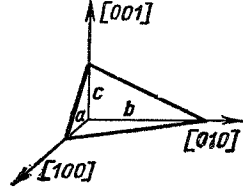
## Кристаллографическая система координат

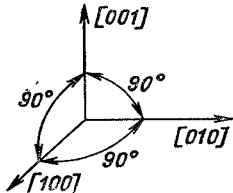
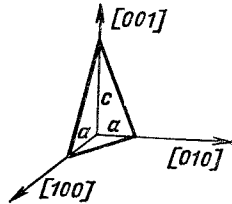
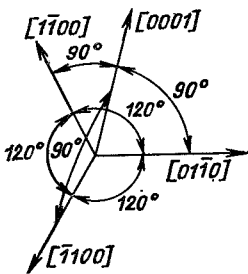
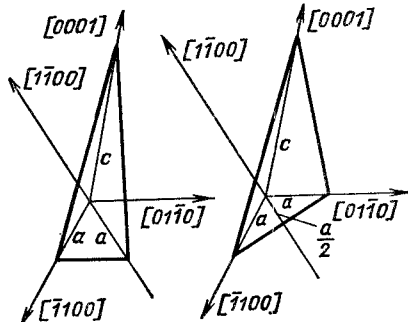
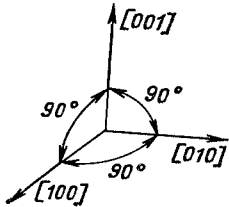
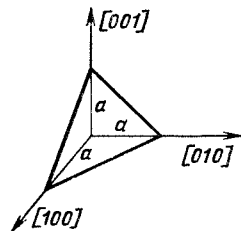
Каждая решетка однозначно определяется своей элементарной ячейкой. Но в одной и той же решетке возможен выбор элементарной ячейки бесконечным числом способов.

Однако во всех классах, исключая относящиеся к триклинной и моноклинной сингониям, может быть выбрана единственная ячейка, однозначно описывающая одинаковые решетки, — это параллелепипед Браве.

Естественно, кристаллографическую систему координат связывают с тройкой координатных некопланарных векторов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , направленных вдоль ребер параллелепипеда Браве, а началом координат является одна из вершин этого параллелепипеда. При этом

Таблица 2.6. Кристаллографическая система координат

| Сингония     | Кристаллографические оси                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Единичная грань                                                                                                                                                                                    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Триклинная   | <p>Оси <math>[100]</math>, <math>[010]</math> параллельны действительным или возможным ребрам кристалла. Ось <math>[001]</math>, параллельная оси наиболее развитого пояса, ставится вертикально; <math>\alpha \neq \beta \neq \gamma</math>:</p>                                                                                                                                | <p>Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки; <math>a \neq b \neq c</math>:</p>    |
| Моноклининая | <p>Ось <math>[010]</math> совмещается с осью 2 или с нормалью к <math>m</math> и располагается горизонтально. Оси <math>[100]</math> и <math>[001]</math> выбираются в плоскости, перпендикулярной <math>[010]</math>, параллельно действительным или возможным осям кристалла, ось <math>[001]</math> — вертикально; <math>\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta</math>:</p>  | <p>Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки; <math>a \neq b \neq c</math>:</p>  |
| Ромбическая  | <p>Оси <math>[100]</math>, <math>[010]</math>, <math>[001]</math> совмещаются с тремя осями 2 или с одной осью 2 и нормалью к двум плоскостям; <math>\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math>:</p>                                                                                                                                                                            | <p>Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки; <math>a \neq b \neq c</math>:</p>   |

| Сингония                      | Кристаллографические оси                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Единичная грань                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Тетрагональная                | <p>За ось <math>[001]</math> принимается ось 4 или <math>\bar{4}</math>. Оси <math>[100]</math> и <math>[010]</math> выбираются в плоскости, перпендикулярной <math>[001]</math>, или по осям 2, или по перпендикулярам к плоскостям <math>m</math>, или по направлениям, параллельным действительным или возможным ребрам кристалла; <math>\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math>:</p>                     | <p>Единичная грань отсекает на двух горизонтальных осях равные отрезки и не равный им отрезок по вертикальной оси <math>[001]</math>; <math>a = b \neq c</math>:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Тригональная и гексагональная | <p>Всего четыре оси. За ось <math>[0001]</math> принимается ось высшего (третьего или шестого) порядка. Оси <math>[1\bar{1}00]</math>, <math>[\bar{1}100]</math> и <math>[01\bar{1}0]</math> выбираются в плоскости, перпендикулярной оси <math>[0001]</math>, или по оси 2, или по нормали к плоскостям <math>m</math>, или по направлениям, параллельным действительным или возможным ребрам кристалла</p>  | <p>Единичная грань отсекает на двух горизонтальных осях равные отрезки и неравный отрезок по <math>[0001]</math>. Если грань отсекает равные отрезки на соседних осях, ее символ может быть (A) <math>[10\bar{1}1]</math>, или <math>[\bar{1}101]</math>, или <math>[0\bar{1}11]</math>, если через одну (B), то ее символ может быть <math>[11\bar{2}1]</math>, или <math>[1\bar{2}11]</math>, или <math>[\bar{2}111]</math></p>  |
| Кубическая                    | <p>Оси совмещаются с тремя осями 4, <math>\bar{4}</math> или 2 (в случае отсутствия четвертых осей); <math>\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math>:</p>                                                                                                                                                                                                                                                    | <p>Единичная грань отсекает на кристаллографических осях равные отрезки: <math>a = b = c</math>:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

вектор

$$hkl = ha_1 + ka_2 + la_3$$

называют кристаллографической осью и обозначают  $[h, k, l]$ . Например, пространственная диагональ параллелепипеда Браве представляет направление  $[111]$ .

Соответствующую кристаллографическому направлению плоскость обозначают теми же индексами, но в круглых скобках  $(h \ k \ l)$ . В табл. 2.6 приведена установка кристаллографических осей для различных сингоний.

Таблица 2.7. Правила выбора кристаллографической системы координат

| Сингония                     | Ориентация относительно кристаллографических осей                                                                                                             | Ориентация относительно элементов симметрии                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Триклинная                   | $Z \parallel [001]$ , или<br>$Y \parallel [010]$ , или<br>$X \parallel [100]$                                                                                 | —                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Моноклинная                  | $Y \parallel [010]$ и $X \parallel [100]$<br>(или $Z \parallel [001]$ ).<br>Иногда $Z \parallel [010]$ и<br>$X \parallel [100]$<br>(или $Y \parallel [001]$ ) | Ось $Y$ параллельна оси 2 или нормали к плоскости $m$ . Иногда ось 2 параллельна оси $Z$                                                                                                                                                           |
| Ромбическая                  | $Z \parallel [001]$ , $Y \parallel [010]$ ,<br>$X \parallel [100]$                                                                                            | Ось $[001]$ параллельна оси 2. Оси $X$ и $Y$ параллельны другим осям 2 или нормальны к $m$                                                                                                                                                         |
| Тригональная, гексагональная | $Z \parallel [0001]$ , $Y \parallel [10\bar{1}0]$ ,<br>иногда $X \parallel [10\bar{1}0]$ , а<br>$Y \parallel [11\bar{2}0]$                                    | Ось $Z$ параллельна оси высшего порядка (3, или $\bar{3}$ , или 6, или $\bar{6}$ ). Ось $X$ параллельна оси 2 (если они имеются, кроме класса $6m2$ ). Для классов $3m$ и $6m2$ обычно $X$ перпендикулярна $m$ , но иногда $m$ нормальна к оси $Y$ |
| Тетрагональная               | $Z \parallel [001]$ , $Y \parallel [010]$ ,<br>$X \parallel [100]$                                                                                            | Ось $Z$ параллельна оси высшего порядка (4 или $\bar{4}$ ). $X$ и $Y$ параллельны осям 2 или нормальны к плоскостям $m$ (если они есть). Для класса $\bar{4}2m$ обычно оси $X$ и $Y$ параллельны осям 2                                            |
| Кубическая                   | $Z \parallel [001]$ , $Y \parallel [010]$ ,<br>$X \parallel [100]$                                                                                            | Оси $X$ , $Y$ , $Z$ параллельны трем осям 4 (или $\bar{4}$ ), а если их нет — трем взаимно нормальным осям 2                                                                                                                                       |

## 2.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ [3,5]

### Кристаллофизическая система координат

Так как кристаллографическая система координат в общем случае не ортогональна, для описания физических свойств используют ортогональную кристаллофизическую систему координат (табл. 2.7).

Как и кристаллографическую систему координат, кристаллофизическую систему выбирают правой так, чтобы в положительный квадрант кристаллофизической системы координат входил квадрант кристаллографической системы с углами, меньшими  $90^\circ$ .

В ряде случаев выбор кристаллофизических осей неоднозначен. В сочетании с неоднозначностью выбора кристаллографических осей для тех же классов произвол оказывается еще большим. Это необходимо учитывать при использовании констант кристаллов, описывающих анизотропные физические свойства. Чаще всего в таких случаях установку осей связывают с данными по дифракции рентгеновского излучения от различных кристаллографических плоскостей.

### Симметрия физических свойств

Математические физические величины описываются тензорами различных рангов.

Физические тензоры в зависимости от их отношения к объекту бывают двух видов: так называемые *полевые* тензоры, описывающие воздействие на кристалл, и *материальные* тензоры, описывающие свойства кристалла, т. е. соотношение между воздействием и реакцией на это воздействие.

**РАНГ ТЕНЗОРА.** Тензор нулевого ранга — *скаляр* — величина, не зависящая от преобразования координат.

Есть величины, сохраняющие числовые значения при преобразовании координат, но при отражении в плоскости, инверсии, зеркальном и инверсионном повороте меняющие знак. Такие величины называют *псевдоскалярами* (или псевдотензорами нулевого ранга). Примером псевдоскаляра может служить вращение плоскости поляризации света.

Тензор первого ранга — *вектор*. Связь между векторами  $a$  и  $c$  можно выразить через компоненты этих векторов ( $a_1, a_2, a_3$  и  $c_1, c_2, c_3$ ) вдоль осей  $X, Y$  и  $Z$ :

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= U_{11}a_1 + U_{12}a_2 + U_{13}a_3; \\ c_2 &= U_{21}a_1 + U_{22}a_2 + U_{23}a_3; \\ c_3 &= U_{31}a_1 + U_{32}a_2 + U_{33}a_3. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Величину, связывающую векторы  $a$  и  $c$ , записывают в виде таблицы

$$U_{ik} = \begin{vmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{vmatrix} \quad (2.2)$$

и называют *тензором второго ранга*. Коэффициенты  $U_{ik}$  называют *компонентами тензора*. Сокращенно (2.1) записывается в виде

$$c_i = U_{ik}a_k, \quad i, k = 1, 2, 3. \quad (2.3)$$

Такая запись предполагает суммирование по повторяющимся индексам.

Связь между вектором и тензором второго ранга описывается тензором третьего ранга

$$c_i = W_{ijk}U_{jk}, \quad (2.4)$$



Таблица 2.8. Соотношения между различными физическими свойствами, описываемыми тензорами различных рангов

| Определяющее уравнение                           | Воздействие                             | Реакция                                                                            | Материальный тензор, описывающий свойство кристалла |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $\Delta S = \left(\frac{c}{T}\right) \Delta T$   | Скаляр                                  | Скаляр                                                                             | Скаляр                                              |
|                                                  | Температура $T$                         | Энтропия $S$                                                                       | Теплоемкость $C$                                    |
| $\Delta P_i = p_i \Delta T$                      | Скаляр                                  | Вектор                                                                             | Вектор                                              |
|                                                  | Температура $T$                         | Поляризация $P$                                                                    | Пироэлектричество $p$                               |
| $\Delta S = Q_i \Delta E_i$                      | Вектор                                  | Скаляр                                                                             | Вектор                                              |
|                                                  | Напряженность электрического поля $E$   | Энтропия $S$                                                                       | Электрокалорический эффект $Q$                      |
| $D_i = \epsilon_{ij} E_j$                        | Вектор                                  | Вектор                                                                             | Тензор второго ранга                                |
|                                                  | Напряженность электрического поля $E$   | Электрическая индукция $D$                                                         | Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{ij}$       |
| $h_i = -k_{i,j} \frac{\partial T}{\partial X_j}$ | Вектор                                  | Вектор                                                                             | Тензор второго ранга                                |
|                                                  | Градиент температуры $\nabla T$         | Плотность теплового потока $h$                                                     | Теплопроводность $k_{i,j}$                          |
| $B_i = \mu_{i,j} H_j$                            | Аксиальный вектор                       | Аксиальный вектор                                                                  | Тензор второго ранга                                |
|                                                  | Напряженность магнитного поля $H$       | Магнитная индукция $B$                                                             | Магнитная проницаемость $\mu_{i,j}$                 |
| $X_{i,j} = \alpha_{i,j} \Delta T$                | Скаляр                                  | Тензор второго ранга                                                               | Тензор второго ранга                                |
|                                                  | Температура $T$                         | Деформация $X_{i,j}$                                                               | Тепловое расширение $\alpha_{i,j}$                  |
| $\Delta S = \beta_{i,j} X_{i,j}$                 | Тензор второго ранга                    | Скаляр                                                                             | Тензор второго ранга                                |
|                                                  | Деформация $X_{i,j}$                    | Энтропия $S$                                                                       | Пьезокалорический эффект $\beta_{i,j}$              |
| $X_{i,j} = d_{i,j,k} E_k$                        | Вектор                                  | Тензор второго ранга                                                               | Тензор третьего ранга                               |
|                                                  | Напряженность электрического поля $E_k$ | Деформация $X_{i,j}$                                                               | Пьезоэлектрический эффект $d_{i,j,k}$               |
| $\Delta B_{i,j} = r_{i,j,k} E_k$                 | Напряженность электрического поля $E_k$ | Нелинейная диэлектрическая проницаемость на оптических частотах $\Delta B_{i,j}$   | Электрооптический эффект $r_{i,j,k}$                |
| $X_{i,j} = s_{i,j,k,l} \sigma_{k,l}$             | Тензор второго ранга                    | Тензор второго ранга                                                               | Тензор четвертого ранга                             |
|                                                  | Механическое напряжение $\sigma_{k,l}$  | Деформация $X_{i,j}$                                                               | Упругая податливость $s_{i,j,k,l}$                  |
| $\sigma_{i,j} = C_{i,j,k,l} X_{k,l}$             | Деформация $X_{k,l}$                    | Механическое напряжение $\sigma_{i,j}$                                             | Упругая жесткость $c_{i,j,k,l}$                     |
| $\Delta B_{i,j} = \pi_{i,j,k,l} \sigma_{k,l}$    | Механическое напряжение $\sigma_{k,l}$  | Нелинейная диэлектрическая непроницаемость на оптических частотах $\Delta B_{ij}$  | Пьезооптический эффект $\pi_{i,j,k,l}$              |
| $\Delta B_{i,j} = p_{i,j,k,l} X_{k,l}$           | Деформация $X_{k,l}$                    | Нелинейная диэлектрическая непроницаемость на оптических частотах $\Delta B_{i,j}$ | Упругооптический эффект $p_{i,j,k,l}$               |

а связь между двумя тензорами второго ранга — тензором четвертого ранга

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} X_{kl}. \quad (2.5)$$

Соотношения типа (2.3) — (2.5) (которые можно было бы продолжить до тензоров сколь угодно высоких рангов) и выражают связь между воздействием на кристалл, реакцией на это воздействие и свойством кристалла. В табл. 2.8 приведены различные материальные и полевые физические свойства, описываемые тензорами различных рангов. В этой же таблице приведены соотношения, связывающие воздействие, реакцию и свойство кристалла.

В табл. 2.8 отражена небольшая часть различных свойств кристаллов. Можно еще упомянуть термоэлектричество, коэффициенты самодиффузии, пиромангнитный и пьезомагнитный эффекты, магнитострикцию, фотогальванический эффект, удельное электрическое сопротивление, электрогирацию и другие эффекты, описываемые тензорами до четвертого ранга включительно. В последнее время исследуются, а иногда и используются эффекты, описываемые тензорами пятого и шестого рангов: нелинейная упругость, акустическая активность, пьезооптический эффект второго порядка, электроупругий эффект и ряд других.

### Матричное описание физических свойств кристаллов

Тензоры различных рангов удобно представлять и использовать в виде матриц. Например, (2.2) представляет матрицу тензора второго ранга. Соотношения между тензорами (например, уравнения (2.3) — (2.5)) также удобно использовать в виде матриц. Операции с матрицами можно найти в специальной литературе [5, 7]. Наиболее важна для настоящего описания операция умножения:

$$(AB)_{ik} = A_{ij} B_{jk}. \quad (2.6)$$

Если матрица  $A$  представляет собой матрицу  $(i \times j)$ , где  $i$  — число строк,  $j$  — число столбцов, а  $B$  есть  $(j \times k)$ -матрица, то произведение  $AB$  является  $(i \times k)$ -матрицей. Элементы этой матрицы задаются соотношением (2.6). Следует помнить, что, как правило,

$$AB \neq BA. \quad (2.7)$$

Весьма часто тензоры второго ранга симметричны

$$A_{ij} = A_{ji}. \quad (2.8)$$

Тензоры третьего ранга бывают симметричными по двум индексам

$$U_{ijk} = U_{jik}, \quad (2.9)$$

а тензоры четвертого ранга — по двум парам индексов

$$U_{ijkl} = U_{jikl} = U_{ijlk}. \quad (2.10)$$

Это позволяет использовать более краткие матричные обозначения с уменьшенным числом индексов. При этом имеется следующая связь между индексами:

$$\begin{array}{cccccc} 11 & 22 & 33 & 23 & 32 & 31 & 13 & 12 & 21 \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & \\ 1 & 2 & 3 & 4 & & 5 & & 6 & \end{array} \quad (2.11)$$

(верхние индексы — тензорные, нижние — индексы сокращенной матрицы).

Таким образом, для тензора второго ранга

$$\begin{vmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 21 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 33 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 1 & 6 & 5 \\ 6 & 2 & 4 \\ 5 & 4 & 3 \end{vmatrix} \rightarrow |1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6|.$$

Таблица 2.9. Матрицы материальных тензоров второго ранга для разных сингоний

| Сингония       | Матрица                          | Примечание                |
|----------------|----------------------------------|---------------------------|
| Триклинная     | $ A_1\ A_2\ A_3\ A_4\ A_5\ A_6 $ | —                         |
| Моноклинная    | $ A_1\ A_2\ A_3\ 0\ A_5\ 0 $     | Ось $Y$ параллельна оси 2 |
| Ромбическая    | $ A_1\ A_2\ A_3\ 0\ 0\ 0 $       | —                         |
| Тетрагональная | $ A_1\ A_1\ A_3\ 0\ 0\ 0 $       | —                         |
| Тригональная   |                                  | —                         |
| Гексагональная | $ A\ A\ A\ 0\ 0\ 0 $             | —                         |
| Кубическая     |                                  | —                         |

Таблица 2.10. Матрицы материальных тензоров третьего ранга для различных кристаллографических классов

#### Триклинная система

| Класс 1                                                                                                                                                                                           | Класс $\bar{1}$        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $\begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \end{vmatrix}$ | Все компоненты равны 0 |

#### Моноклинная сингония

| Класс 2 (Ось $Y$ параллельна оси второго порядка)                                                                                               | Класс $m$ (ось $Y$ перпендикулярна плоскости симметрии)                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{34} & 0 & T_{36} \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{24} & 0 & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & T_{35} & 0 \end{vmatrix}$ |

Класс  $2/m$  — все компоненты равны 0.

#### Ромбическая сингония

| Класс 222                                                                                                              | Класс $2m$                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{36} \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{24} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ |

Класс  $mmm$  — все компоненты равны 0

#### Тетрагональная сингония

| Класс 4                                                                                                                                    | Класс $\bar{4}$                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & T_{14} & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -T_{15} & T_{14} & 0 \\ T_{31} & -T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & T_{16} \end{vmatrix}$ |

#### Класс 422

| Класс 422                                                                                                          | Класс $4\ m\ m$                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$ |

Класс  $\bar{4}2m$  (ось  $X$  параллельна оси второго порядка)

|                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{36} \end{vmatrix}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Для классов  $4/m$  и  $4/mmm$  — все компоненты равны 0

## Тригональная сингония

## Класс 3

$$\begin{vmatrix} T_{11} & -T_{11} & 0 & T_{14} & T_{15} & 2T_{22} \\ T_{22} & -T_{22} & 0 & T_{15} & -T_{14} & 2T_{11} \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс 3  $m$  (ось  $X$  перпендикулярна плоскости симметрии)

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 2T_{21} \\ T_{21} & -T_{21} & 0 & T_{15} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

## Гексагональная сингония

## Класс 6

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & -T_{14} & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

## Класс 622

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс 6 $m2$  (ось  $X$  перпендикулярна плоскости симметрии)

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2T_{22} \\ -T_{22} & T_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

## Кубическая сингония

Классы 23 и  $\bar{4}3m$ 

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{14} \end{vmatrix}$$

## Предельные группы (текстуры)

Симметрия  $\infty$ 

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & T_{14} & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Симметрия  $\infty 22$ 

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

## Класс 32

$$\begin{vmatrix} T_{11} & -T_{11} & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 2T_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Для классов  $\bar{3}$ ,  $\bar{3}m$  — все компоненты равны 0

Класс 6 $m$ 

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс  $\bar{6}$ 

$$\begin{vmatrix} T_{11} & -T_{11} & 0 & 0 & 0 & 2T_{22} \\ -T_{22} & T_{22} & 0 & 0 & 0 & 2T_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Для классов 6/ $m$  и 6/ $mmm$  все компоненты равны 0

## Ромбическая сингония

Классы 222, 2 $m$ ,  $mmm$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$$

## Тригональная сингония

Классы 3,  $\bar{3}$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & -p_{14} & -p_{15} & -p_{16} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & -p_{41} & 0 & p_{44} & p_{45} & p_{51} \\ p_{51} & -p_{51} & 0 & -p_{45} & p_{44} & p_{41} \\ -p_{16} & p_{16} & 0 & -p_{15} & p_{14} & * \end{vmatrix}$$

Классы 3 $m$ , 32,  $\bar{3}m$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & -p_{14} & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & -p_{41} & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{14} * \end{vmatrix}$$

## Тетрагональная сингония

Классы 4,  $\bar{4}$ , 4/ $m$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & p_{16} \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & -p_{16} \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ p_{61} & -p_{61} & 0 & 0 & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$$

Классы 4  $m m$ ,  $\bar{4}2m$ , 422, 4/ $mmm$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$$

## Гексагональная сингония

Классы 6,  $\bar{6}$ , 6/ $m$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & p_{16} \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & -p_{16} \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{54} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p_{54} & p_{44} & 0 \\ -p_{16} & p_{16} & 0 & 0 & 0 & * \end{vmatrix}$$

Классы  $\bar{6}m2$ , 6 $mm$ , 622, 6/ $mmm$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * \end{vmatrix}$$

## Кубическая сингония

Классы 23,  $m\bar{3}$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{13} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{13} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{vmatrix}$$

Классы  $\bar{4}3m$ , 432,  $m\bar{3}m$ 

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{vmatrix}$$

Примечание. Знаком \* обозначено  $\frac{1}{2} (p_{11} - p_{12})$ .

Таблица 2.11. Матрицы материальных тензоров четвертого ранга с попарно симметричными индексами (фотоупругость, электрострикция и т. п.) для различных кристаллографических классов

| Триклинная сингония                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Моноклинная сингония                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Классы 1, $\bar{1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Классы 2, $m$ , 2/ $m$ . Ось 2 или нормаль к $m$ параллельны оси $Y$                                                                                                                                                                                                                   |
| $\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & p_{14} & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 0 & p_{24} & 0 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & p_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & 0 & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{64} & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$ |

Для тензора третьего ранга  $U_{ijk}$ , симметричного по индексам  $ij$ , получается матрица (3×6) вместо матрицы (3×9):

$$\begin{vmatrix} 111 & 112 & 113 & 121 & 122 & 123 & 131 & 132 & 133 \\ 211 & 212 & 213 & 221 & 222 & 223 & 231 & 232 & 233 \\ 311 & 312 & 313 & 321 & 322 & 323 & 331 & 332 & 333 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 \\ 31 & 32 & 33 & 34 & 35 & 36 \end{vmatrix}$$

Для тензора четвертого ранга, симметричного попарно по индексам  $ij$  и  $kl$ , вместо матрицы  $(19 \times 9)$  получается матрица  $(6 \times 6)$ .

При переходе к более компактной матрице следует помнить, что для компонент, содержащих индексы 4, 5, 6 в сокращенном обозначении, надо вводить численные множители (2, 4 и т. п.) относительно соответствующих правил (2.11) компонент тензорной матрицы.

На матрицы материальных тензоров накладываются дополнительные ограничения, связанные с симметрией кристаллов (табл. 2.9—2.11).

Классы симметрии, для которых все компоненты тензора третьего ранга равны нулю, обладают общим элементом симметрии — центром симметрии. Это не случайно, а является следствием *принципа Неймана*. Суть этого принципа в том, что группа симметрии любого физического свойства какого-либо кристалла включает элементы симметрии класса, к которому принадлежит данный кристалл. Это условие необходимое, но недостаточное. Например, для существования пьезоэлектричества отсутствие центра симметрии обязательно. Но в кристалле без центра симметрии пьезоэффекта может и не быть.

В приведенных в табл. 2.9—2.11 матрицах для многих кристаллографических классов несколько компонент должны быть равны друг другу. Обычно их обозначают одинаково по компоненте с наименьшими индексами. При использовании таблиц следует помнить о всех не равных нулю компонентах, так как в таблицах приводятся только независимые компоненты.

Например, для класса 32 (случай кристалла кварца) есть только две независимые компоненты матрицы, описывающей пьезоэффект. Однако, как следует из матрицы (см. табл. 2.10), компонента  $d_{11}$  может описывать, во-первых, деформацию растяжения — сжатия по оси  $X$  при приложении электрического поля по той же оси, во-вторых, деформацию растяжения — сжатия по оси  $Y$  при приложении электрического поля по оси  $X$  и, в-третьих, деформацию сдвига  $XY$  при приложении поля по оси  $Y$ .

Некоторые материальные тензоры четвертого ранга (например, тензор упругой жесткости  $c_{ijkl}$ ) симметричны не только относительно перестановки первого со вторым и третьего с четвертым индексов, но и относительно перестановки первой пары индексов со второй:

$$c_{ijkl} = c_{jikl} = c_{ijlk} = c_{klij}. \quad (2.12)$$

При этом вид матриц  $(6 \times 6)$ , приведенных в табл. 2.11, сохраняется, но число независимых компонент уменьшается за счет уменьшения в 2 раза числа независимых недиагональных компонент (так как  $c_{ij} = c_{ji}$ ). Например, для класса 3 независимые компоненты тензора фотосупругости —  $p_{12}$ ,  $p_{13}$ ,  $p_{14}$ ,  $p_{15}$ ,  $p_{16}$ ,  $p_{31}$ ,  $p_{33}$ ,  $p_{41}$ ,  $p_{44}$ ,  $p_{45}$ , а независимые компоненты тензора упругой жесткости для того же класса —  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{13}$ ,  $c_{14}$ ,  $c_{15}$ ,  $c_{16}$ ,  $c_{44}$ ,  $c_{45}$ .

### Влияние внешнего воздействия

В кристаллофизике помимо принципа Неймана есть еще один симметричный постулат, позволяющий определить симметрию кристалла при внешнем воздействии. Этот постулат называют *принципом Кюри*. Согласно этому принципу кристалл при внешнем воздействии изменя-

ет свою точечную симметрию, но сохраняет элементы симметрии, общие с симметрией воздействия.

Для определения реакции на воздействие можно использовать перемножение матриц согласно (2.6). Например, так записывают уругопьезоэлектрическую матрицу:

$$\begin{array}{c|cccccc} & X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 \\ \hline \begin{array}{c} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{array} & \begin{array}{c|cccccc} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ \hline c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ \hline c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ \hline c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ \hline c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ \hline c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{array} & \begin{array}{c|ccc} D_1 & D_2 & D_3 \\ \hline g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ \hline g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ \hline g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ \hline g_{41} & g_{42} & g_{43} \\ \hline g_{51} & g_{52} & g_{53} \\ \hline g_{61} & g_{62} & g_{63} \end{array} \end{array} \quad (2.13)$$

Первый столбец матриц в данной записи описывает воздействие, а первая строка — реакцию. В частности, деформация в кристалле ииобата лития (класс 3), вызванная электрическим полем с компонентами по осям  $X$  и  $Z$ , записывается так:

$$\begin{array}{c|cccccc} & X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 \\ \hline \begin{array}{c} E_1 \\ 0 \\ E_3 \end{array} & \begin{array}{c|cccccc} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 2d_{11} \\ \hline d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{array} \end{array} \quad (2.14)$$

В соответствии с (2.6) из (2.14) получаем:  $X_1 = E_1 d_{11} + E_3 d_{31}$ ;  $X_3 = E_3 d_{33}$ ;  $X_2 = -E_1 d_{11} + E_3 d_{31}$ ;  $X_5 = E_1 d_{15}$ ;  $X_4 = X_6 = 0$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. Т. 1. М.: Наука, 1979.
2. Шубников А. В., Флинт Е. Е., Бокий Г. Б. Основы кристаллографии. М.: Изд-во АН СССР, 1940.
3. Шувалов Л. А. // Современная кристаллография. Т. 4. М.: Наука, 1981.
4. Залесский А. В. // Современная кристаллография. Т. 4. М.: Наука, 1981.
5. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967.
6. Вустер У. Применение тензоров и теории групп для описания физических свойств кристаллов. М.: Мир, 1977.
7. Кочин Н. Е. Векторное исчисление и начало тензорного исчисления. М.: Наука, 1965.
8. Желудев И. С. Симметрия и ее приложения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.

# ГЛАВА 3

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Н. В. Кадобнова, А. М. Братковский

### 3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В зависимости от вида нагружения (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез) и условий воздействия (температура, скорость, периодичность и время приложения) материалы принято характеризовать различными мерами сопротивления их деформации и разрушению — характеристиками механических свойств.

Механические свойства условно могут быть разделены на три основные группы.

Первая группа содержит комплекс характеристик, определяемых при однократном кратковременном нагружении. К ним относятся упругие свойства: модуль нормальной упругости  $E$ , модуль сдвига  $G$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ . Сопротивление малым упругопластическим деформациям определяется пределами упругости  $\sigma_{упр}$ , пропорциональности  $\sigma_{пл}$  и текучести  $\sigma_{0,2}$ . Предел прочности  $\sigma_B$ , сопротивление срезу  $\tau_{ср}$  и сдвигу  $\tau_{сдв}$ , твердость вдавливанием (по Бринеллю)  $HB$  и царапанием (по шкале Мооса), а также разрывная длина  $L_R$  являются характеристиками материалов в области больших деформаций вплоть до разрушения. Пластичность характеризуется относительным удлинением  $\delta$  и относительным сужением  $\psi$  после разрыва, способностью к деформации ряда неметаллических материалов — удлинением при разрыве  $\delta_R$ . Кроме того, при ударном изгибе определяет ударная вязкость образца с надрезом  $KCU$ .

Вторая группа включает параметры, оценивающие сопротивление материалов переменным и длительным статическим нагрузкам. При повторном нагружении в области многоциклового усталости определяется предел выносливости на базе  $10^7 \div 2 \cdot 10^7$  циклов. Малоцикловая усталость отделяется от многоциклового условно выбранной базой испытания ( $N \geq 5 \cdot 10^4$  циклов) и отличается пониженной частотой нагружения ( $f = 0,1 \div 5$  Гц). Сопротивление малоциклового усталости оценивается по долговечности при заданном уровне повторных напряжений или пределом малоциклового усталости на выбранной базе испытаний. Сопротивление длительным статическим нагрузкам определяют, как правило, при температуре выше  $20^\circ C$ . Критериями сопротивления материалов длительному действию постоянных напряжений и температуры являются пределы ползучести  $\sigma_{0,2}/\tau$  и длительной прочности  $\sigma_t$ . Предел длительной прочности определяют при заданной базе испытаний, обычно 100 и 1000 ч, предел ползучести — по заданному допуску на остаточную (обычно 0,2%) или общую деформацию при установленной базе испытаний.

Третью группу составляют характеристики разрушения. В инженерной практике эти характеристики используются сравнительно недавно. Характеристики разрушения определяются на образцах с заранее выращенными начальными трещинами и оцениваются следующими основными параметрами: вязкость разрушения, критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации  $K_{IS}$ , вязкость разрушения, условный критический коэффициент интенсивности напряжений при плосконапряженном состоянии  $K_{sc}$ , удельная работа образца с трещиной  $KCT$  и скорость роста трещины усталости  $CRTU$  при заданном размахе интенсивности напряжений  $\Delta K$ .

Среди механических свойств только упругие свойства металлических материалов являются структурно нечувствительными характеристиками, связанными с параметрами кристаллической решетки и практически не зависящими

ми от режимов термомеханической обработки, если последние не вызывают аллотропических превращений. Для практически изотропных поликристаллических металлических материалов упругие константы связаны соотношением  $E = 2G(1 + \mu)$ . Упругие свойства определяют при статических испытаниях ( $E_{ст}$ ,  $G_{ст}$ ) или динамическим методом ( $E_{дин}$ ,  $G_{дин}$ ) по резонансной частоте колебаний тонкого стержня равномерного сечения под действием малых напряжений. Значения упругих констант, определенных обоими методами, при температуре  $20^\circ C$  и близких к ней практически одинаковы. С повышением температуры при статических испытаниях сказывается влияние деформации ползучести, вследствие чего статический метод дает прогрессирующее понижение значений упругих констант относительно данных, полученных динамическим методом.

Все другие механические свойства в большей или меньшей степени структурно чувствительны и анизотропны. Резкая анизотропия упругих и других механических характеристик присуща многим неметаллическим материалам, что определяется их ориентированным строением. Некоторая анизотропия свойственна и большинству металлических материалов. Уровень прочности, пластичности, выносливости и характеристики разрушения обычно в продольном направлении относительно оси деформации полуфабриката выше, чем в поперечном. Однако для некоторых, например титановых, сплавов характерна «обратная» анизотропия. Наблюдается значительная разница в пределах текучести при растяжении и сжатии у большинства магнелиевых деформируемых сплавов ( $\sigma_{0,2сж} \ll \sigma_{0,2}$ ).

Между некоторыми характеристиками механических свойств экспериментально установлены зависимости, позволяющие с достаточной степенью точности оценивать предел прочности материала по значениям твердости, а сопротивление срезу — по пределу прочности. Существуют также корреляционные связи между пределом выносливости и пределом прочности, а также между различными характеристиками разрушения.

### 3.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $20^\circ C$

Механические свойства металлов и сплавов при растяжении определяются по ГОСТ 1497—84, при сжатии — по ГОСТ 25.503—80, при кручении — по ГОСТ 3565—80, при срезе — по ОСТ 1.90148—74. ГОСТ 9012—59 регламентирует методику определения твердости по Бринеллю, ГОСТ 9013—59 — твердости по Роквеллу, ГОСТ 9450—76 — микротвердости, ГОСТ 9454—78 — ударной вязкости.

Определение механических свойств пластмасс при растяжении проводится по ГОСТ 11262—80 и ГОСТ 25.603—82, при сжатии — по ГОСТ 4651—82. Упругие свойства оцениваются по ГОСТ 9550—81, твердость — по ГОСТ 4647—80. Прочность при разрыве и модуль эластичности резин определяются согласно ГОСТ 270—75 и ГОСТ 210—75 соответственно.

В табл. 3.1—3.32 представлены следующие характеристики:

$E$  — модуль упругости — коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и относительным удлинением;

$G$  — модуль сдвига (модуль касательной упруго-

сти) — коэффициент пропорциональности между касательным напряжением и относительным сдвигом;

$\mu$  — коэффициент Пуассона — абсолютное значение отношения поперечной деформации к продольной в упругой области;

$\sigma_{пл}$  — предел пропорциональности — напряжение, при нагружении до которого деформации возрастают пропорционально напряжениям; в технике принят условный  $\sigma_{пл}$  — напряжение, при котором отклонение приращения деформации от линейного закона достигает определенного значения, обычно 50 %;

$\sigma_{0,2}$  — предел текучести (условный) — напряжение, при котором остаточная деформация после снятия нагрузки составляет 0,2 %;

$\sigma_b$  — временное сопротивление (предел прочности), прочность на разрыв (для неметаллических материалов) — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом при испытании;

$\delta$  — относительное удлинение — отношение абсолютного остаточного удлинения образца после разрыва к начальной расчетной длине;

$\psi$  — относительное сужение — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к начальной площади;

$\delta_p$  — относительное удлинение при разрыве (для неметаллических материалов) — полное изменение расчетной длины образца в момент разрыва, отнесенное к начальной расчетной длине;

$L_p$  — разрывная длина — характеристика прочности нитей, волокон, тканей и других материалов, для которых невозможно точно определить площадь поперечного сечения; вычисляется по формулам  $L_p = P_p \frac{l}{Q}$ ;  $L_p = \frac{P_p}{gb}$ ,

где  $P_p$  — нагрузка при разрыве;  $Q$ ,  $l$  и  $b$  — масса, длина и ширина образца между зажимами;  $g$  — масса 1 м<sup>2</sup> материала;

KCU — ударная вязкость — работа разрушения образца с кольцевым надрезом при ударном изгибе, отнесенная к площади образца в сечении надреза, для неметаллов определяется также на образцах без надреза;

HВ — твердость по Бринеллю, определяемая вдавливанием стального шарика в испытуемый материал как среднее напряжение, приходящееся на единицу поверхности сферического отпечатка;

$H_p$  — микротвердость — сопротивление вдавливанию алмазного наконечника при очень малых нагрузках с получением малых глубин и размеров отпечатка

Твердость по шкале Мооса — сопротивление механическому воздействию минералов и других материалов, определяемое царапанием. Мерой твердости служит номер наиболее твердого минерала, не оставляющего следа при царапании. Эталоны твердости являются тальк [1], гипс [2], кальций [3], флюорит [4], апатит [5], ортоклаз [6], кварц [7], топаз [8], корунд [9], алмаз [10].

## Металлы

Таблица 3.1. Упругие свойства металлов

| Металл    | E, ГПа  | G, ГПа  | $\mu$ | Литература   | Металл     | E, ГПа  | G, ГПа  | $\mu$    | Литература    |
|-----------|---------|---------|-------|--------------|------------|---------|---------|----------|---------------|
| Алюминий  | 69—72   | 25—26,5 | 0,31  | [1, 5]       | Никель     | 200—220 | 73—77   | 0,3—0,4  | [1, 2, 4]     |
| Бериллий  | 300     | 145     | 0,03  | [1, 3]       | Ниобий     | 91—160  | —       | 0,39     | [1, 6]        |
| Бор       | 345     | —       | —     | [1]          | Олово      | 41—55   | 16—19   | 0,33     | [1, 2, 4]     |
| Ванадий   | 139—170 | 47—60   | 0,36  | [1, 3, 6]    | Осний      | 575     | 225     | 0,28     | [3, 8]        |
| Висмут    | 32      | 12      | 0,33  | [1, 4]       | Палладий   | 115—125 | 49—52   | 0,39     | [1—4, 8]      |
| Вольфрам  | 350—400 | 125—155 | 0,3   | [1, 4, 6]    | Платина    | 150—175 | 61—68,5 | 0,36     | [1—3, 8]      |
| Гадолиний | 56—98   | 23      | 0,26  | [2, 3]       | Прозеродим | 35—98   | 14      | 0,3      | [2, 3]        |
| Гафний    | 79—150  | —       | 0,29  | [1, 2, 6]    | Рений      | 475     | —       | —        | [2]           |
| Германий  | 82      | —       | —     | [1]          | Родий      | 385     | 150     | 0,26     | [3, 8]        |
| Гольмий   | 67      | —       | —     | [2]          | Рубидий    | 2,5     | —       | —        | [1]           |
| Диспрозий | 64—98   | 26      | 0,24  | [2, 3]       | Рутений    | 420—500 | 175     | 0,31     | [3, 8]        |
| Железо    | 195—205 | 77—80   | 0,28  | [1, 3, 4, 7] | Самарий    | 34—55   | 13      | 0,35     | [2, 3]        |
| Золото    | 78—83   | 28,5    | 0,4   | [3, 8]       | Свинец     | 14—18   | 5,5—8   | 0,45     | [1, 2, 4, 14] |
| Индий     | 10,5    | —       | 0,46  | [1, 2]       | Селен      | 55      | 19      | 0,45     | [1, 4]        |
| Иридий    | 520—590 | 220     | 0,28  | [2, 6, 8]    | Серебро    | 72—83,5 | 27—29,5 | 0,37     | [1, 3, 4, 8]  |
| Иттербий  | 18      | —       | —     | [2]          | Сурьма     | 57—78   | —       | —        | [1, 2]        |
| Иттрий    | 66      | 26      | 0,27  | [2, 3]       | Таллий     | 8       | —       | —        | [1, 2]        |
| Кадмий    | 50—53   | 20      | 0,3   | [1, 4, 7]    | Тантал     | 190     | 70      | 0,35     | [1, 3, 6]     |
| Кальций   | 26      | —       | —     | [1, 2]       | Теллур     | 44      | —       | —        | [4]           |
| Кобальт   | 206     | 78,5    | 0,32  | [1, 2]       | Тербий     | 57,5    | —       | —        | [2]           |
| Кремний   | 110—160 | —       | —     | [1, 2]       | Титан      | 110     | 41,5    | 0,33     | [3, 10]       |
| Лантан    | 38      | 15      | 0,26  | [2, 3]       | Торий      | 74—80   | —       | —        | [1, 2]        |
| Литий     | 5       | —       | 0,42  | [2, 4]       | Уран       | 210     | —       | —        | [1]           |
| Магний    | 42,5—45 | 16—18   | 0,35  | [1, 3, 4, 7] | Хром       | 280—315 | 110     | 0,31     | [1—3]         |
| Марганец  | 200     | —       | —     | [1]          | Цезий      | 1,75    | —       | —        | [1]           |
| Медь      | 110—130 | 41,5—44 | 0,38  | [1—3, 7]     | Церий      | 44      | —       | 0,25     | [3]           |
| Молибден  | 300—330 | 120     | 0,31  | [3, 6]       | Цинк       | 100—130 | 37      | 0,3—0,35 | [1, 2, 7]     |
| Неодим    | 38      | 15      | 0,28  | [2, 3]       | Цирконий   | 84—97   | 33      | 0,35     | [1, 2, 6]     |
|           |         |         |       |              | Эрбий      | 73—115  | 30      | 0,24     | [2, 3]        |

Таблица 3.2. Прочность и пластичность металлов

| Металл    | Состояние, степень чистоты     | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа                | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа   | Литература |
|-----------|--------------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------|------------|-----------|------------|
| Алюминий  | Отожженное, 99,95 % А1         | 22                   | 50                              | 45           | 90         | 150       | [1, 3—5]   |
|           | » , 99,5 % А1                  | 30                   | 80                              | 35           | 80         | 250       | [1, 3—5]   |
| Барий     | »                              | —                    | 12                              | —            | 40         | —         | [4, 11]    |
| Бериллий  | Литое                          | —                    | 140                             | 0            | —          | —         | [1, 3, 4]  |
|           | Отожженное                     | 230                  | 320                             | 2,5          | —          | —         | [1, 3, 4]  |
|           | Горячепрессованное             | 300                  | 450                             | 3,5          | —          | 1500      | [1, 3, 4]  |
| Бор       | Отожженное                     | —                    | 250 ( $\sigma_{B, \text{сж}}$ ) | —            | —          | —         | [1]        |
| Ванадий   | » , 99,98 % V                  | 105                  | 220                             | 30           | 75         | 800       | [3, 4, 6]  |
|           | » , 99,6 % V                   | 540                  | 590                             | 10           | 25         | —         | [3, 4, 6]  |
| Висмут    | »                              | —                    | 5—20                            | 0            | 0          | 90        | [1, 4]     |
| Вольфрам  | Деформированное, 99,95 % W     | 760                  | 1000                            | 0            | 0          | 4150      | [1, 3]     |
|           | Рекристаллизованное, 99,95 % W | —                    | 500                             | 0            | 0          | 3200      | [1, 3]     |
| Гадолиний | Кованое                        | 270                  | 395                             | 7            | —          | 700       | [3]        |
| Галлий    | Отожженное                     | —                    | 40                              | 40           | —          | 60        | [1]        |
| Гафний    | »                              | 500                  | 700                             | 6            | 25         | 1600      | [1, 6]     |
| Германий  | »                              | —                    | 68 ( $\sigma_{B, \text{сж}}$ )  | —            | —          | —         | [4, 11]    |
| Гольмий   | Литое                          | 220                  | 260                             | 5            | —          | 500       | [3]        |
| Диспрозий | »                              | 230                  | 250                             | 6            | —          | 550       | [3]        |
|           | Кованое                        | 330                  | 435                             | 3            | —          | 1030      | [3]        |
| Железо    | Отожженное, особой чистоты     | 170                  | 290                             | 50           | 90         | 800       | [3]        |
| Золото    | Отожженное                     | 40                   | 150                             | 40           | 90         | 220       | [1, 8]     |
| Иридий    | »                              | 90—100               | 400—500                         | 6—10         | 10—15      | 1700—2200 | [8]        |
| Иттербий  | »                              | 67                   | 75                              | 6            | —          | —         | [2]        |
| Итрий     | »                              | 280                  | 300                             | 4            | 8          | 900—1650  | [2, 3]     |
| Кадмий    | »                              | 10                   | 75                              | 20           | 50         | 200       | [1, 4]     |
| Кальций   | »                              | 13,5                 | 60                              | 10           | 58         | 300       | [1, 4]     |
| Кобальт   | Литое, 99,4 % Со               | —                    | 240                             | —            | —          | 1250      | [1, 3, 4]  |
|           | Закаленное, 99,4 % Со          | 210                  | 280                             | 4            | 8          | 1500      | [1, 3, 4]  |
|           | Отожженное, 99,4 % Со          | 300                  | 470                             | 3,5          | 4,5        | 1550      | [1, 3, 4]  |
| Кремний   | »                              | —                    | 700                             | 0            | 0          | —         | [1, 4]     |
| Лантан    | Литое                          | 125                  | 130                             | 8            | —          | 400       | [3]        |
|           | Кованое                        | 190                  | 220                             | 4            | —          | —         | [3]        |
| Литий     | Отожженное                     | —                    | 115                             | 50           | —          | —         | [1, 4]     |
| Магний    | Литое                          | 24                   | 115                             | 8            | 9          | 300       | [1, 3, 4]  |
|           | Отожженное                     | 40                   | 185                             | 15           | 20         | —         | [1, 3, 4]  |
|           | Деформированное                | 90                   | 195                             | 10           | 12         | 400       | [1, 3, 4]  |
| Медь      | Отожженное                     | 70                   | 215                             | 60           | 75         | 400       | [3]        |
|           | Нагартованное                  | 380                  | 440                             | 6            | 35         | 1000      | [3]        |
| Молибден  | Отожженное                     | 570                  | 670                             | 25           | 50         | 1800      | [1, 3]     |
| Неодим    | Литое                          | 165                  | 170                             | 11           | —          | —         | [3]        |
|           | Кованое                        | —                    | 215                             | 2            | —          | 400       | [3]        |
| Никель    | Отожженное                     | 80                   | 400                             | 40           | 70         | 860       | [1, 3]     |
| Ниобий    | » , высокой чистоты            | 210                  | 275                             | 28           | 80         | 500       | [1, 3, 4]  |
|           | » , технической чистоты        | 280                  | 330                             | 20           | 80         | 700       | [1, 3, 4]  |
|           | Литое                          | 500                  | 600                             | 10           | 20         | —         | [1, 3, 4]  |
| Олово     | Отожженное                     | —                    | 30                              | 40           | 75         | 60        | [4]        |
| Осмий     | Отожженное                     | —                    | —                               | —            | —          | 3000—4000 | [1, 6]     |
| Палладий  | »                              | 60                   | 195                             | 40           | 85         | 480       | [3, 8]     |
| Платина   | »                              | 70                   | 145                             | 45           | 95         | 470       | [3, 8]     |
| Празеодим | Литое                          | 100                  | 110                             | 10           | —          | —         | [3]        |
|           | Кованое                        | 200                  | 215                             | 7            | —          | 400       | [3]        |
| Рений     | Отожженное                     | —                    | 500                             | 20           | —          | 2000      | [1]        |
| Родий     | »                              | 70—100               | 400—570                         | 8—15         | 20—25      | 1000—1300 | [3, 8]     |
| Рутений   | »                              | 360—400              | 500—600                         | 3—10         | —          | 2000—3000 | [3, 8]     |
| Самарий   | Литое                          | 115                  | 125                             | 3            | —          | —         | [3]        |
|           | Кованое                        | 180                  | 190                             | 8            | —          | 550       | [3]        |
| Свинец    | Отожженное                     | 5                    | 14—18                           | 50           | 100        | —         | [1, 14]    |
| Селен     | »                              | —                    | —                               | —            | —          | 710       | [4]        |
| Серебро   | »                              | 20—30                | 140—180                         | 45           | 90         | 500       | [1, 3, 8]  |
| Скандий   | »                              | —                    | 400                             | 10           | —          | 550       | [2, 3]     |
| Стронций  | »                              | —                    | 50                              | 2            | 10         | —         | [4, 8]     |
| Сурьма    | »                              | —                    | 8                               | 0            | 0          | —         | [1, 4]     |

| Металл   | Состояние, степень чистоты | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа   | Литература    |
|----------|----------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|-----------|---------------|
| Таллий   | Отожженное                 | —                    | 9                | 35           | 100        | —         | [1]           |
| Тантал   | »                          | 400                  | 500              | 30           | 75         | 1250—1400 | [1, 3, 6]     |
| Теллур   | Нагартованное              | —                    | 950              | 4            | 6          | 2250      | [1, 3, 6]     |
| Титан    | Отожженное                 | —                    | 10               | 35           | 100        | 270       | [1, 4]        |
|          | » , особой чистоты         | 100                  | 250              | 70           | 85         | 600       | [2, 3, 6, 10] |
|          | » , 99,6 %                 | 300                  | 350              | 30           | 60         | —         | [2, 3, 6, 10] |
| Торий    | »                          | 180                  | 220              | 60           | 70         | —         | [1]           |
| Уран     | »                          | 200                  | 300              | 12           | 15         | —         | [1]           |
| Хром     | »                          | 190                  | 300              | 2            | 5          | 1000      | [3, 6]        |
| Церий    | Литое                      | 90                   | 105              | 24           | —          | 250       | [1, 3]        |
|          | Кованое                    | 110                  | 150              | 17           | —          | 300       | [1, 3]        |
| Цинк     | Отожженное                 | 100                  | 125              | 12           | —          | —         | [1]           |
| Цирконий | »                          | 80—115               | 230—280          | 25           | 40         | 570       | [1, 4, 11]    |
| Эрбий    | Литое                      | 295                  | 300              | 4            | —          | 600       | [3]           |
|          | Кованое                    | 290                  | 320              | 7            | —          | 950       | [3]           |

### Стали

Используемые в машиностроении стали делятся на конструкционные (углеродистые и легированные) и высоколегированные нержавеющие.

Марка конструкционной углеродистой стали содержит двузначное число, обозначающее среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 380—71, ГОСТ 1050—74).

Согласно ГОСТ 4543—71 в обозначении марок конструкционной легированной стали первые две цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы за цифрами означают: Р — бор, Ю — алюминий, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Г — марганец, Н — никель, М — молибден, В — вольфрам. Цифры после буквы указывают примерное процентное содержание легирующего элемента в целых единицах; отсутствие цифр означает, что в стали содержится до 1,5% этого легирующего элемента. В конце наименования марки высококачественной стали ставится буква А. У особо высококачественной стали в конце обозначения марки стоит через тире буква Ш.

В марках нержавеющих высоколегированных сталей по ГОСТ 5632—72 химические элементы обозначаются следующими буквами: А — азот, В — вольфрам, Д — медь, М — молибден, Р — бор, Т — титан, Ю — алюминий, Х — хром, Б — ниобий, Г — марганец, Е — селен, Н — никель, С — кремний, Ф — ванадий, К — кобальт, Ц — цирконий. Цифры, стоящие в наименовании марки после букв, указывают, так же как и в наименовании марок конструкционных сталей, процентное содержание легирующего элемента в целых единицах. Содержание элемента, присутствующего в стали в малых количествах, цифрами не обозначается. Цифра перед буквенным обозначением указывает на среднее или при отсутствии нижнего предела на максимальное содержание углерода в стали в сотых долях процента. Наименование марки литейной стали заканчивается буквой Л.

Механические свойства конструкционных сталей зависят от содержания углерода, для углеродистых сталей содержание углерода является определяющим (рис. 3.1, табл. 3.3).

Между некоторыми характеристиками механических свойств сталей установлены эмпирические зависимости.

Твердость по Бринеллю приблизительно пропорциональна временному сопротивлению: для мало- и среднепрочных углеродистых и термически обработанных сталей  $\sigma_B = 0,3 \div 0,4$  НВ. Сопротивление срезу  $\tau_{ср}$  для мало- и среднепрочных сталей составляет 65—80% их предела прочности, для высокопрочных — 55—65%. Предел текучести при сжатии примерно равен пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ , определенному при растяжении.

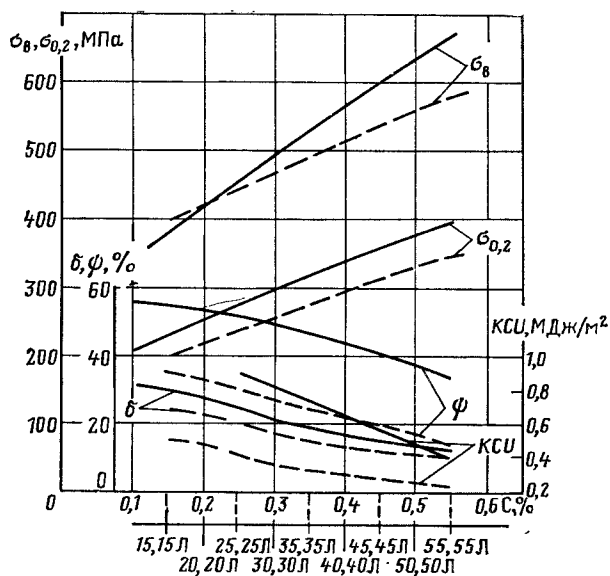


Рис. 3.1. Механические свойства конструкционных углеродистых деформируемых и литейных сталей в зависимости от содержания углерода [3, 24]: сплошные линии — деформируемые стали, пунктирные — литейные; по оси абсцисс — марки сталей в соответствии со средним содержанием углерода



Таблица 3.3. Механические свойства углеродистых и малолегированных сталей малой и средней прочности после нормализации [3,24]  $E = 200 \div 210$  ГПа;  $G = 77 \div 81$  ГПа;  $\mu = 0,28 \div 0,31$

| Стали                                                     | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа | KCU, МДж/м² |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|---------|-------------|
| <i>Стали углеродистые обыкновенного качества</i>          |                      |                  |              |            |         |             |
| Ст0                                                       | —                    | 320              | 22           | —          | —       | —           |
| Ст1, Ст1КБ                                                | —                    | 320—400          | 33           | —          | 1100    | —           |
| Ст2, Ст2КБ                                                | 190—220              | 340—420          | 31           | —          | 1160    | —           |
| Ст3, Ст3КБ                                                | 210—240              | 380—500          | 25—27        | 55—65      | 1310    | —           |
| Ст4, Ст4КБ                                                | 240—260              | 420—520          | 23—23        | —          | 1430    | —           |
| Ст5                                                       | 260—280              | 500—640          | 19—21        | 45—55      | 1700    | —           |
| Ст6                                                       | 300—310              | 600—710          | 14—16        | 40         | 1970    | —           |
| <i>Стали углеродистые качественные и малолегированные</i> |                      |                  |              |            |         |             |
| 08                                                        | 200                  | 330              | 33           | 60         | —       | —           |
| 10                                                        | 210                  | 340              | 31           | 55         | 1160    | —           |
| 15                                                        | 230                  | 380              | 27           | 55         | 1300    | —           |
| 20, 15Г, 10Г2                                             | 250                  | 430              | 25           | 55         | 1430    | —           |
| 25, 20Г                                                   | 280                  | 460              | 24           | 50         | —       | 0,9         |
| 30, 25Г                                                   | 300                  | 500              | 22           | 50         | 1970    | 0,9         |
| 35, 30Г                                                   | 320                  | 550              | 20           | 45         | —       | 0,8         |
| 40, 35Г                                                   | 340                  | 580              | 19           | 45         | —       | 0,7         |
| 45, 40Г, 30Г2                                             | 360                  | 610              | 16           | 45         | 2290    | 0,6         |
| 50, 45Г, 35Г2                                             | 380                  | 640              | 14           | 40         | 2410    | 0,5         |
| 55, 50Г, 40Г2                                             | 390                  | 670              | 12           | 40         | 2550    | 0,4         |
| 60, 45Г2                                                  | 410                  | 700              | 12           | 40         | 2550    | —           |
| 65, 60Г                                                   | 420                  | 710              | 11           | 35         | 2550    | —           |
| 70, 65Г, 50Г2                                             | 440                  | 750              | 10           | 30         | 2690    | —           |
| 70Г                                                       | 460                  | 800              | 8            | —          | —       | —           |
| 75*1                                                      | 900                  | 1100             | 7            | 30         | —       | —           |
| 80*1                                                      | 950                  | 1100             | 6            | 30         | —       | —           |
| 85*1                                                      | 1000                 | 1150             | 6            | 30         | —       | —           |

\*1 После закалки и отпуска.

Таблица 3.4. Механические свойства конструкционных деформируемых легированных сталей после закалки и отпуска [3, 9, 24]  $E = 200 \div 210$  ГПа;  $G = 77 \div 81$  ГПа;  $\mu = 0,28 \div 0,31$

| Стали                                                                                  | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа   | KCU, МДж/м² |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-----------|-------------|
| <i>Стали малой прочности*1</i>                                                         |                  |                      |              |            |           |             |
| 09Г2, 09Г2Д, 12ГС, 14Г2, 19Г, 12ХГ                                                     | 450—480          | 300—400              | 18           | —          | —         | —           |
| 15ГС, 18Г2С, 10Г2СД, 14ХГС                                                             | 500              | 350                  | 18           | —          | —         | —           |
| 10ХСНД, 15ХГН, 15ХСНД                                                                  | 520—540          | 360—400              | 16—18        | —          | —         | —           |
| 25Г2С, 35ГС                                                                            | 600              | 400                  | 14           | —          | —         | —           |
| <i>Стали средней прочности</i>                                                         |                  |                      |              |            |           |             |
| 20ХГСА                                                                                 | 800              | 650                  | 12           | 45         | 2070      | 0,7         |
| 39ХГН, 33ХС, 20ХН4ФА*2                                                                 | 900              | 700                  | 12—13        | 45—50      | 2290      | 0,8—1,0     |
| 35Х, 30ХРА, 38ХА, 30ХМ, 38ХС, 20ХН3А                                                   | 950              | 750—800              | 11—12        | 45—55      | 1970—2290 | 0,7—1,0     |
| 40Х, 40ХР, 45Х, 35ХМ, 20ХГР, 40ХГ, 40ХГР, 40ХН, 18ХНВА                                 | 1000—1050        | 800—850              | 9—12         | 45—50      | 2070—2400 | 0,6—0,9     |
| 50Х, 50ХН, 35ХМФА, 30ХГНА, 25ХГСА, 30ХГС, 30ХГСА, 40ХНМА*2, 40ХНВА*2, 25ХНВА*2, 30ХН3А | 1100             | 850—950              | 9—12         | 40—50      | 2170—2290 | 0,5—0,8     |

| Стали                                           | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа   | КСУ, МДж/м² |
|-------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-----------|-------------|
| <i>Высокопрочные стали</i>                      |                  |                      |              |            |           |             |
| 35ХГСА*, 30ХГСНА*,<br>30Х2ГН2СВМА* <sup>2</sup> | 1500—1650        | 1200—1300            | 10—13        | 45—55      | 4100—4500 | 0,7—0,9     |
| 30ХГНСМА                                        | 1750             | 1400                 | 10           | 45         | 4600      | 0,6         |
| 40ХГСНЗВА* <sup>3</sup>                         | 1900             | 1400                 | 11           | 50         | 4900      | 0,6         |
| 40ХГСНЗВА                                       | 2000             | 1500                 | 10           | 40         | 5150      | 0,55        |
| Н18К9М5Т (закалка и старение)                   | 2050             | 1950                 | 7            | 50         | —         | 0,5         |
| <i>Жаропрочные стали</i>                        |                  |                      |              |            |           |             |
| 30ХМА, 20Х3МВФ, 33ХНЗМА                         | 900—950          | 750—850              | 12—19        | 50—60      | 2290      | 0,9—1,3     |
| 30ХА, 30ХГСА, 30ХЗВА, 40ХНВА                    | 1050—1100        | 950                  | 14—16        | 55—65      | 2290      | 0,6—1,4     |
| 30Х2Н2ВФА                                       | 1150             | 1100                 | 15           | 60         | 2400      | 0,8         |
| 23Х2НВФА                                        | 1350             | 1150                 | 13           | 55         | —         | 0,6         |
| 30ХГСНА                                         | 1600             | 1350                 | 9            | 45         | —         | 0,6         |

\*<sup>1</sup> После нормализации.\*<sup>2</sup> НВ = 2690 МПа.\*<sup>3</sup> Изотермическая закалка.Таблица 3.5. Прочность и пластичность конструкционных литейных сталей [3]  
 $E = 190 \div 200$  ГПа

| Стали                                                 | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа   | КСУ, МДж/м² |
|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-----------|-------------|
| <i>Легированные стали после закалки и отпуска</i>     |                  |                      |              |            |           |             |
| 27ГЛ, 30ГСЛ, 40ХЛ                                     | 650              | 400—500              | 10—14        | 20—30      | 1800—2290 | 0,35—0,5    |
| 35ХНЛ, 35ХМЛ, 30ХГСТЛ                                 | 700              | 500—550              | 12           | 25         | 2070—2600 | 0,4         |
| 35ХГСМЛ, 30ХНМЛ, 30ХНВЛ                               | 800              | 600—650              | 10—12        | 20—30      | 2170—2690 | 0,4         |
| 35ХГСМЛ, 30ДХСНЛ, 27ХГСНЛ                             | 900—1000         | 700—850              | 8—10         | 20—30      | —         | 0,25—0,4    |
| 27ХГСНЛ, после изотермической закалки                 | 1300—1500        | 1000—1200            | 5—6          | 20         | —         | 0,25        |
| <i>Жаропрочные стали после нормализации и отпуска</i> |                  |                      |              |            |           |             |
| 20МЛ, 25МЛ, 20ХМЛ, 20ХМФЛ                             | 450—500          | 250—315              | 16—20        | 30—40      | —         | 0,3—0,4     |
| 30ХМЛ, 23Х5МЛ                                         | 650—700          | 400—450              | 16—18        | 30—40      | —         | 0,6         |
| Х6Н2МВФ после закалки и отпуска                       | 990              | 700                  | 10           | 20         | —         | —           |

Таблица 3.6. Механические свойства нержавеющей сталей [3, 9]

| Стали                                                       | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа   | КСУ, МДж/м² |
|-------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-----------|-------------|
| <i>Аустенитные стали после закалки</i>                      |                  |                      |              |            |           |             |
| 04Х18Н10, 08Х18Н10Т,<br>08Х18Н12Б, 10Х17Н13М3Т              | 420—520          | 180—200              | 40           | 55         | 1350—2000 | —           |
| 08Х18Н12Т, 12Х18Н9,<br>08Х17Н16М3Т, 20Х18Н9,<br>06Х23Н28М2Т | 550—600          | 200—220              | 35—40        | 55         | 1350—2000 | —           |
| 20Х13Н4Г9, 12Х17Г9АН4,<br>12Х14Г14Н                         | 650—700          | 250—300              | 35—40        | 45—50      | 1600—2000 | —           |
| Х18Н9Л                                                      | 450              | 200                  | 25           | 35         | —         | 1           |

| Стали                                                                                                                       | $\sigma_B$ , МПа                                          | $\sigma_{0,2}$ , МПа                                    | $\delta$ , %                           | $\psi$ , %                               | НВ, МПа                       | KCU, МДж/м²                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| <i>Аустенитно-ферритные стали после закалки</i>                                                                             |                                                           |                                                         |                                        |                                          |                               |                                                |
| 08X20H14C2, 20X20H14C2<br>08X21H5T, 10X21H5T,<br>08X21H6M2T                                                                 | 550—600<br>650—700                                        | 250—300<br>300—450                                      | 35—40<br>20—30                         | —<br>—                                   | —<br>—                        | 1<br>0,6                                       |
| <i>Ферритные и полужерритные стали после отпуска</i>                                                                        |                                                           |                                                         |                                        |                                          |                               |                                                |
| 12X17, 08X17T, 15X28, 15X25T<br>10X13Л, 20X13Л                                                                              | 450—500<br>550—650                                        | 250—300<br>400—450                                      | 18—20<br>12—16                         | 40—55<br>40—50                           | 1400—1900<br>—                | —<br>0,6—0,8                                   |
| <i>Мартенситные стали после закалки и отпуска</i>                                                                           |                                                           |                                                         |                                        |                                          |                               |                                                |
| 10X13, 20X13<br>30X13, 40X13<br>23X13HBNФ<br>10X17H2, 10X12H2BMФ,<br>13X14HBPА<br>08X17H3CЛ<br>10X13H3BФЛ                   | 1200<br>1650—1750<br>1500<br>1100—1300<br>850—950<br>1200 | 1050<br>1400—1550<br>1100<br>900—1000<br>650—750<br>100 | 10—18<br>3—8<br>10<br>8—12<br>6—8<br>7 | 45—60<br>—<br>40<br>50—60<br>10—20<br>20 | 2550<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— | 0,5—0,7<br>—<br>0,4<br>0,6—1,2<br>0,25<br>0,19 |
| <i>Стали переходного класса после закалки, обработки холодом и старения</i>                                                 |                                                           |                                                         |                                        |                                          |                               |                                                |
| 08X15H9Ю, 08X16H6, 08X17H5M3<br>10X15H4AM3                                                                                  | 1200<br>1450—1600                                         | 900<br>1200                                             | 10<br>15—20                            | —<br>50—60                               | —<br>—                        | 0,5<br>1—1,5                                   |
| <i>Мартенситно-старяющие стали после закалки и старения</i>                                                                 |                                                           |                                                         |                                        |                                          |                               |                                                |
| 08X15H5Д2ТБ<br>03X12H10Д2ТБ                                                                                                 | 1150—1300<br>1600                                         | 1000—1300<br>1500                                       | 18—20<br>4                             | 60—70<br>60                              | —<br>—                        | 1,4—2<br>0,8                                   |
| <i>Жаропрочные стали после закалки и старения</i>                                                                           |                                                           |                                                         |                                        |                                          |                               |                                                |
| 45X14H14B2M, после отжига<br>12XH35BMTP, 12XH35BT<br>40X15H7Г7Ф2МС, 40X12H8Г8МФБ,<br>10X12H20Т3Р, 10X12H22Т3МР<br>10XH35BTЮ | 720<br>800—950<br>900<br>1320                             | 320<br>450—550<br>600<br>950—1000                       | 20<br>25<br>15<br>20—25                | 35<br>40<br>25<br>40                     | —<br>—<br>—<br>—              | 0,5<br>0,6<br>0,3<br>0,75                      |

### Алюминиевые сплавы

Для обозначения состояний деформируемых сплавов приняты следующие шифры: М — мягкий, отожженный; П — полунатертованный; Н — нагартованный; Т — закаленный и естественный состаренный; Т1 — закаленный и искусственно состаренный на высокую прочность; Т2 — закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему по сравнению с режимом Т1 более высокие значения вязкости разрушения и сопротивления коррозии под напряжением; Т3 — закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему наиболее высо-

кое сопротивление коррозии под напряжением и высокие значения вязкости разрушения. Буква «ч» в обозначении марки сплава указывает на повышенную чистоту сплава (по примесям). Химический состав сплавов — по ГОСТ 4784—74

Режимы термической обработки литейных сплавов дополнительно к марке сплава обозначаются следующим образом: Т1 — искусственное старение без предварительной закалки; Т2 — высокотемпературное старение. Отливки, не подвергавшиеся термической обработке, дополнительного шифра при марке сплава не имеют. Химический состав сплавов — по ГОСТ 2685—75.

Таблица 3.7. Механические свойства алюминиевых деформируемых сплавов малой и средней прочности [3,5]

$E = 70 \div 72,5$  ГПа;  $G = 27 \div 28$  ГПа;  $\mu = 0,31 \div 0,33$  (для тонких плакированных листов  $E = 68,5 \div 70$  ГПа)

| Система легирования | Сплав, состояние | Полуфабрикат       | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\tau_{ср}$ , МПа | НВ, МПа |
|---------------------|------------------|--------------------|------------------|----------------------|--------------|-------------------|---------|
| Al, технический     | АД1М<br>АД1Н     | Пруток, лист       | 80               | 35                   | 35           | 55                | 250     |
|                     |                  | То же              | 150              | 100                  | 6            | 70                | 320     |
| Al—Mn               | АМцМ             | Лист               | 110              | 60                   | 23           | 80                | 300     |
|                     | АМцП             | »                  | 170              | 130                  | 10           | 100               | 400     |
|                     | АМцН             | »                  | 220              | 180                  | 5            | 110               | 550     |
| Al — Mg             | АМг1М            | Лист, пруток       | 120              | 50                   | 28           | 100               | 300     |
|                     | АМг2М            | То же              | 190              | 100                  | 23           | 125               | 450     |
|                     | АМг2П            | Лист               | 250              | 210                  | 8            | 140               | 680     |
|                     | АМг2Н            | »                  | 280              | 230                  | 5            | —                 | 770     |
|                     | АМг3М            | Лист, пруток       | 230              | 120                  | 25           | 155               | 580     |
|                     | АМг3Н            | Лист               | 270              | 230                  | 8            | —                 | 750     |
|                     | АМг4М            | Лист, пруток       | 280              | 140                  | 23           | 175               | —       |
|                     | АМг4П            | Лист               | 320              | 240                  | 12           | —                 | —       |
|                     | АМг5М            | »                  | 300              | 150                  | 20           | —                 | 650     |
|                     | АМг5М            | Пруток, штамповка  | 300              | 160                  | 14           | 180               | —       |
|                     | АМг6М            | Лист, профиль      | 340              | 170                  | 20           | 210               | —       |
|                     | АМг6М            | Поковка            | 300              | 150                  | 14           | —                 | —       |
|                     | АМг6Н            | Лист               | 400              | 300                  | 9            | 250               | —       |
| Al—Mg—Si            | АД31Т            | Профиль, пруток    | 170              | 80                   | 20           | —                 | —       |
|                     | АД31Т1           | То же              | 250              | 210                  | 13           | 150               | 800     |
|                     | АД33Т            | »                  | 240              | 140                  | 20           | 160               | 650     |
|                     | АД33Т1           | »                  | 320              | 280                  | 12           | 190               | 950     |
|                     | АД35Т            | »                  | 270              | 200                  | 15           | 155               | 600     |
|                     | АД35Т1           | »                  | 330              | 300                  | 10           | 180               | 950     |
|                     | АВТ1             | »                  | 350              | 290                  | 12           | 210               | 950     |
|                     | »                | Штамповка          | 310              | 260                  | 10           | 190               | 850     |
| Al—Cu—Mg            | Д1Т, Д1чТ        | Штамповка          | 410              | 280                  | 25           | 270               | —       |
|                     | Д16чТ, Д16Т      | Лист, плита        | 450              | 320                  | 18           | 290               | —       |
|                     | Д16чТ, Д16Т      | Профиль, пруток    | 480              | 350                  | 12           | 290               | —       |
|                     | Д16Т1, Д16чТ1    | Лист, плита        | 470              | 400                  | 8            | —                 | —       |
|                     | Д19Т, Д19чТ      | Лист               | 440              | 310                  | 16           | —                 | —       |
|                     | Д19Т, Д19чТ      | Профиль, пруток    | 480              | 350                  | 10           | 290               | —       |
|                     | ВАД1Т            | Лист               | 440              | 280                  | 18           | —                 | —       |
|                     | »                | Профиль, пруток    | 500              | 360                  | 13           | —                 | —       |
|                     | ВД17Т1           | Штамповка          | 520              | 340                  | 17           | —                 | —       |
|                     | АК4-1Т1          | Лист, плита        | 420              | 360                  | 7            | —                 | —       |
|                     | »                | Профиль, пруток    | 420              | 370                  | 7            | —                 | —       |
|                     | »                | Поковка            | 420              | 320                  | 8            | —                 | —       |
| Al—Zn—Mg            | В92Т1            | Лист, плита        | 400              | 300                  | 10           | —                 | —       |
|                     | »                | Профиль, пруток    | 470              | 350                  | 8            | —                 | —       |
|                     | 1915Т1           | Лист, плита        | 360              | 280                  | 11           | —                 | —       |
|                     | »                | Профиль, пруток    | 380              | 320                  | 10           | —                 | —       |
|                     | 1911Т1           | Лист, плита        | 420              | 350                  | 12           | —                 | —       |
|                     | »                | Профиль, пруток    | 520              | 420                  | 15           | —                 | —       |
| Al—Cu—Mg—Si         | АК6Т1            | Поковка, штамповка | 420              | 340                  | 10           | 260               | —       |
|                     | АК8Т1            | Штамповка          | 420              | 310                  | 10           | —                 | —       |
|                     | »                | Пруток             | 480              | 380                  | 10           | 290               | —       |

Таблица 3.8. Механические свойства алюминиевых деформируемых высокопрочных сплавов [5]

| Система легирования | Сплав, состояние | Полуфабрикат       | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $\tau_{ср}$ , МПа | НВ, МПа |
|---------------------|------------------|--------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------------------|---------|
| Al—Zn—Cu—Mg         | B95пчТ1          | Лист               | 570              | 500                  | 12           | 27         | 320               | —       |
|                     | »                | Профиль, панель    | 600              | 550                  | 12           | 20         | 330               | 1600    |
|                     | B95пчТ2          | Все полуфабрикаты  | 540              | 460                  | 12           | 30         | 320               | 1500    |
|                     | B95пчТ3          | То же              | 500              | 410                  | 12           | 34         | 310               | 1400    |
|                     | B93пчТ2          | Поковка, штамповка | 470              | 440                  | 10           | 30         | 310               | 1250    |
|                     | B93пчТ3          | То же              | 440              | 360                  | 10           | 40         | 290               | 1150    |
|                     | B96ЦЗТ1          | »                  | 630              | 600                  | 10           | 25         | —                 | 1750    |
|                     | B96ЦЗТ3          | »                  | 540              | 470                  | 12           | —          | —                 | —       |
|                     | B96Ц1Т1          | Профиль            | 720              | 680                  | 6            | —          | —                 | —       |
|                     | B96Ц1Т2          | »                  | 660              | 630                  | 8            | 14         | —                 | —       |
| Al—Cu—Li            | ВАД23Т1          | Лист               | 560              | 500                  | 5            | —          | —                 | —       |
|                     |                  | Профиль, прутки    | 590              | 550                  | 5            | —          | 340               | 1500    |

Таблица 3.9. Механические свойства алюминиевых заклепочных сплавов (проволока) [5]

| Система легирования | Сплав, состояние | $\tau_{ср}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ, МПа |
|---------------------|------------------|-------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|---------|
| Al—Mg               | АМГ5пМ           | 190               | 270              | 150                  | 23           | —          | 700     |
| Al—Cu—Mg            | Д18Т             | 210               | 300              | 170                  | 24           | 50         | 700     |
|                     | В65Т             | 260               | 400              | 250                  | 20           | 50         | 900     |
|                     | Д19пТ            | 290               | 460              | 280                  | 20           | 40         | 1200    |
|                     | Д16пТ            | 290               | 450              | 290                  | 18           | 35         | 1200    |
| Al—Zn—Mg—Cu         | В95пТ1           | 340               | 580              | 510                  | 8            | —          | 1500    |
|                     | В95пТ3           | 310               | 500              | 360                  | 10           | 45         | —       |

Таблица 3.10. Механические свойства порошковых и высокомодульных алюминиевых сплавов [5]

| Система легирования               | Сплав     | Полуфабрикат   | $E$ , ГПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % |
|-----------------------------------|-----------|----------------|-----------|----------------------|------------------|--------------|
| Al—Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | САП-1     | Профиль        | 72        | 210                  | 300              | 20           |
|                                   | САП-1     | Лист           | 72        | 300                  | 340              | 10           |
|                                   | САП-2     | Профиль        | 75        | 280                  | 350              | 7            |
|                                   | САП-2     | Лист           | 75        | 290                  | 370              | 7            |
|                                   | САП-3     | Пруток, полоса | 77        | 300                  | 400              | 4            |
| Al—Si—Ni                          | САС-1-50  | Пруток         | 100       | 210                  | 340              | 2,5          |
|                                   | »         | Труба          | 100       | 190                  | 320              | 1,5          |
|                                   | САС-1-400 | Пруток         | 100       | 170                  | 270              | 2,5          |
| Al—Be—Mg                          | АБМ1      | Лист           | 135       | 300                  | 450              | 16           |
|                                   | АБМ3      | »              | 200       | 480                  | 580              | 7            |

Таблица 3.11. Механические свойства алюминиевых литейных сплавов [3,5]

Обозначения способа литья: З — в землю; К — в кокиль; О — в оболочечные формы; В — по выплавляемым моделям; Д — под давлением

| Система легирования               | Сплав, состояние | Способ литья | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\tau_{ср}$ , МПа | НВ, МПа |
|-----------------------------------|------------------|--------------|------------------|----------------------|--------------|-------------------|---------|
| <i>Жаропрочные сплавы</i>         |                  |              |                  |                      |              |                   |         |
| Al—Cu—Ni—Mg                       | АЛ1, АЛ1Т7       | З            | 200—220          | 170—180              | 1            | 170               | 800—900 |
|                                   | АЛ1Т5            | З            | 260              | 220                  | 0,5          | 220               | 1000    |
| Al—Si—Cu—Mg                       | АЛ1Т5            | К            | 300              | 260                  | 1            | —                 | 1200    |
|                                   | АЛ3Т5            | З, О         | 250              | 170                  | 1,5          | —                 | 750     |
|                                   | АЛ3Т5            | З, К, В, О   | 210              | —                    | 1            | —                 | 700     |
|                                   | АЛ5Т5            | З            | 260              | 210                  | 1            | —                 | 800     |
|                                   | АЛ5Т7            | З, К         | 240              | 180                  | 1,5          | —                 | 900     |
|                                   | АЛ32Т5           | З, К         | 240—260          | 170—190              | 2            | —                 | 600—700 |
|                                   | АЛ32Т6           | З, К         | 250—270          | 180—220              | 1,5—2        | —                 | 600—700 |
|                                   | АЛ4МТ5           | З            | 340              | 250                  | 3            | 240               | 1000    |
|                                   | АЛ4МТ5           | К            | 370              | 270                  | 4            | 250               | 1100    |
|                                   | В124Т6           | К            | 420              | 365                  | 2,5          | 330               | 1200    |
|                                   | В124Т6           | З            | 360              | 350                  | 0,5          | —                 | 1100    |
| Al—Cu—Mn                          | АЛ19Т4           | З, К, В, О   | 320              | 210                  | 10           | —                 | 850     |
|                                   | АЛ19Т5           | З, К, В, О   | 375              | 280                  | 5            | —                 | 1100    |
| Al—Cu—Mn—Ni                       | АЛ33Т5           | З            | 280              | 180                  | 2            | —                 | 900     |
|                                   | АЛ33Т6           | З            | 300              | —                    | 1            | —                 | 1000    |
| <i>Герметичные сплавы</i>         |                  |              |                  |                      |              |                   |         |
| Al—Si (силумины)                  | АЛ2              | З            | 175              | 80                   | 6            | —                 | 550     |
|                                   | АЛ4Т6            | Д            | 215              | 115                  | 2            | —                 | —       |
|                                   | АЛ9Т4, Т5        | З            | 260              | 200                  | 4            | 145               | 700     |
|                                   | АЛ9-1Т5          | З, К         | 290—210          | 110—120              | 2—4          | —                 | 600     |
|                                   |                  | З            | 270              | 150                  | 5            | —                 | —       |
|                                   |                  | К            | 270              | 220                  | 4            | —                 | —       |
|                                   | АЛ9-1Т6          | К            | 320              | 240                  | 7            | —                 | —       |
|                                   | ВАЛ8Т5           | К            | 400              | 340                  | 4            | —                 | —       |
|                                   | АЛ34Т3           | К            | 325              | 275                  | 6            | —                 | —       |
| <i>Коррозионно-стойкие сплавы</i> |                  |              |                  |                      |              |                   |         |
| Al—Mg                             | АЛ8Т4            | З, В, К, О   | 300              | 170                  | 12           | 230               | 600     |
|                                   | АЛ13Т4           | З, В, К, О   | 160              | 100                  | 1—3          | —                 | 550     |
|                                   | АЛ22Т4           | З, О, В, К   | 240              | 180                  | 1—3          | —                 | 900     |
|                                   | АЛ23Т4           | К            | 250              | 140                  | 10           | —                 | 600     |
|                                   | АЛ23-1           | К            | 260              | 140                  | 12           | 200               | 750     |
|                                   | АЛ23-1Т4         | К            | 230              | 130                  | 7            | 180               | 600     |
|                                   | АЛ27Т4           | З, В, К      | 360              | 180                  | 16           | 250               | 800     |
|                                   | АЛ27-1Т4         | З, В, К      | 380              | 190                  | 18           | 260               | 850     |
|                                   | АЛ28             | З, В, К      | 205              | —                    | 4—5          | —                 | 550     |
|                                   | АЛ31Т4           | З, К         | 360              | 160                  | 25           | —                 | —       |

# Титановые сплавы

Химический состав сплавов — по ГОСТ 19807—74.

Таблица 3.12. Механические свойства титановых сплавов [3,10]

$$E = 110 \div 120 \text{ ГПа}; \quad G = 42 \div 45 \text{ ГПа}; \quad \mu = 0,31 \div 0,34$$

| Сплав                                                | Система легирования | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $\tau_{ср}$ , МПа | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |
|------------------------------------------------------|---------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------------------|-------------------------|
| <i>Сплавы малой прочности после отжига</i>           |                     |                  |                      |              |            |                   |                         |
| BT1-0                                                | 99,28% Ti           | 350—500          | 300—420              | 30           | 60         | —                 | —                       |
| BT1-1                                                | 99,04% Ti           | 450—600          | 380—500              | 25           | 50         | 300               | —                       |
| ПТ7М                                                 | Ti—Al—Zr            | 480—680          | —                    | 20           | —          | —                 | 0,8                     |
| OT4-0                                                | Ti—0,8Al—Mn         | 500—650          | —                    | 30           | —          | —                 | —                       |
| OT4-1                                                | Ti—2Al—1,5Mn        | 600—750          | 470                  | 20           | 35—70      | 400               | 0,5—1,0                 |
| AT2                                                  | Ti—Zr—Mo            | 600—750          | —                    | 20           | —          | —                 | —                       |
| BT1-1Л                                               | 99,04% Ti           | 450—600          | —                    | 20           | 40         | —                 | 0,5                     |
| <i>Среднепрочные сплавы после отжига</i>             |                     |                  |                      |              |            |                   |                         |
| OT4                                                  | Ti—Al—Mn            | 700—900          | 600                  | 15           | 45         | —                 | 0,35—1,0                |
| BT5,                                                 | Ti—Al               | 750—950          | 650—700              | 15           | 25—40      | 600—650           | 0,4—0,5                 |
| BT5-1                                                | Ti—Al—Sn            | —                | —                    | —            | —          | —                 | —                       |
| BT4                                                  | Ti—Al—Mn            | 850—1000         | —                    | 12           | —          | —                 | —                       |
| BT6C                                                 | Ti—Al—V             | 850—1000         | 800—900              | 10           | —          | —                 | —                       |
| BT6                                                  | Ti—Al—V             | 950—1050         | 900                  | 8            | 30         | 640               | 0,3—0,5                 |
| BT14                                                 | Ti—Al—Mo—V          | 930—1100         | 850—1000             | 10           | 20         | —                 | 0,6—1,2                 |
| BT20                                                 | Ti—Al—Mo—V          | 950—1100         | 850—1000             | 18           | —          | —                 | —                       |
| BT5Л                                                 | Ti—Al               | 700—900          | 620                  | 7—12         | 18—25      | —                 | 0,35                    |
| BTЛ-1                                                | Ti—Al—Si            | 1000—1100        | 900—1000             | 5—10         | 10—20      | —                 | 0,15                    |
| BT6Л                                                 | Ti—Al—V             | ≥850             | —                    | ≥5           | —          | —                 | ≥0,25                   |
| BT20Л                                                | Ti—Al—Zr—Mo         | ≥900             | 850                  | ≥5           | 20         | —                 | ≥0,3                    |
| BT21Л                                                | Ti—Al—Zr            | ≥1000            | —                    | ≥4           | —          | —                 | ≥0,2                    |
| <i>Высокопрочные сплавы после закалки и старения</i> |                     |                  |                      |              |            |                   |                         |
| BT6                                                  | Ti—Al—V             | 1150             | 1050                 | 8            | 30         | —                 | 0,25                    |
| BT14                                                 | Ti—Al—Mo—V          | 1150—1400        | 1080—1300            | 7            | 20         | —                 | 0,25                    |
| BT22                                                 | Ti—Al—Mo—V—Fe—Cr    | 1250—1400        | 1180—1300            | 5—8          | 35—50      | —                 | 0,3                     |
|                                                      |                     | 1080*            | 1000                 | 18           | 40         | —                 | —                       |
| BT23                                                 | Ti—Al—Mo—V—Fe—Cr    | 1300—1500        | 1200—1400            | 5            | —          | —                 | 0,6                     |
| BT15                                                 | Ti—Al—Mo—Cr         | 1300—1500        | 1160—1400            | 3            | —          | —                 | 0,2                     |
| TC6                                                  | Ti—Al—V—Cr          | —                | —                    | —            | —          | —                 | —                       |
| <i>Жаропрочные сплавы после отжига</i>               |                     |                  |                      |              |            |                   |                         |
| BT8                                                  | Ti—Al—Mo—Si         | 1050             | 900                  | 10           | —          | 650               | 0,35                    |
| BT9                                                  | Ti—Al—Mo—Si—Zr      | 1150             | 1000                 | 6            | —          | 685               | 0,35                    |
| BT3-1                                                | Ti—Al—Mo—Cr—Si—Fe   | 1000             | 950                  | 12           | —          | 635               | 0,4                     |
| BT9Л                                                 | Ti—Al—Mo—Fr         | ≥950             | —                    | ≥5           | —          | —                 | 0,2                     |

\* После отжига.

## Магниевые сплавы

Для обозначения состояний магниевых деформируемых сплавов принята следующая маркировка: М — отожженный; Н — нагартованный; Т1 — искусственно состаренный; Т4 — закаленный; Т6 — закаленный и искусственно состаренный; Т8 — закаленный, нагартованный и искусственно состаренный. Химический состав сплавов по ГОСТ 14957—76.

Литейные сплавы в зависимости от режима термической обработки отливок имеют дополнительные шифры при марке сплава: Т1 — искусственное старение; Т2 — отжиг; Т4 — закалка; Т6 — закалка и старение. Химический состав сплавов по ГОСТ 2856—79.

Магниевые сплавы, полуфабрикаты которых после горячей деформации или литья не подвергаются термической обработке, дополнительного шифра при марке сплава не имеют.

Таблица 3.13. Механические свойства магниевых деформируемых сплавов [3,24]

 $E = 43 \text{ ГПа}; G = 16 \text{ ГПа}; \mu = 0,33$ 

| Система легирования                                                                                                           | Сплав, состояние | Полуфабрикат                       | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_{\text{цц}}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $\sigma_{0,2 \text{ сж}}$ , МПа | $\tau_{\text{ср}}$ , МПа | KCU, МДж/м <sup>2</sup> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------|------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <i>Сплавы малой и средней прочности</i>                                                                                       |                  |                                    |                  |                      |                            |              |            |                                 |                          |                         |
| Mg — Mn                                                                                                                       | MA1M             | Лист                               | 210              | 120                  | —                          | 8            | —          | —                               | —                        | 0,05                    |
|                                                                                                                               | MA1M             | Пруток                             | 240              | 150                  | —                          | 4            | 6          | 85                              | 130                      | 0,06                    |
| Mg — Al — Zn — Mn                                                                                                             | MA2              | Пруток, штамповка                  | 265              | 165                  | 80                         | 10           | 30         | 110                             | 160                      | 0,12                    |
|                                                                                                                               | MA2M             | Лист                               | 250              | 150                  | —                          | 18           | —          | —                               | —                        | —                       |
| Mg — Mn                                                                                                                       | MA8              | Пруток                             | 260              | 150                  | —                          | 7            | —          | —                               | 150                      | 0,1                     |
|                                                                                                                               | MA8M             | Лист                               | 250              | 160                  | —                          | 18           | —          | —                               | —                        | —                       |
|                                                                                                                               | MA8H             | »                                  | 270              | 190                  | —                          | 15           | —          | —                               | —                        | —                       |
|                                                                                                                               | MA9              | Пруток                             | 270              | 240                  | —                          | 10           | 11         | —                               | —                        | 0,6                     |
|                                                                                                                               | MA9M             | Лист                               | 250              | 180                  | 100                        | 15           | —          | —                               | —                        | —                       |
| <i>Высокопрочные сплавы</i>                                                                                                   |                  |                                    |                  |                      |                            |              |            |                                 |                          |                         |
| Mg — Al — Zn — Mn                                                                                                             | MA2-1            | Плита, поковка, штамповка, профиль | 275              | 170                  | 100                        | 12           | —          | 85                              | 140                      | 0,08                    |
|                                                                                                                               | MA2-1M           | Лист                               | 280              | 180                  | —                          | 16           | —          | —                               | —                        | —                       |
|                                                                                                                               | MA3              | Пруток, поковка, штамповка         | 275              | 220                  | 100                        | 13           | 25         | —                               | 140                      | 0,1                     |
|                                                                                                                               | MA3M             | »                                  | —                | —                    | —                          | —            | —          | —                               | —                        | —                       |
| Mg — Zn — Zr                                                                                                                  | MA5T4            | То же                              | 315              | 220                  | 130                        | 13           | 20         | 140                             | 180                      | —                       |
|                                                                                                                               | MA14T1           | Пруток                             | 340              | 280                  | 150                        | 10           | 25         | 160                             | 160                      | 0,08                    |
|                                                                                                                               | MA14T1           | Штамповка, поковка                 | 315              | 255                  | —                          | 13           | —          | —                               | —                        | —                       |
| Mg — Al — Cd — Ag — Mn                                                                                                        | MA10T6           | Пруток, профиль                    | 400              | 295                  | 130                        | 5            | 8          | 240                             | —                        | 0,03                    |
| <i>Жаропрочные сплавы</i>                                                                                                     |                  |                                    |                  |                      |                            |              |            |                                 |                          |                         |
| Mg — Ce — Mn                                                                                                                  | MA11T6           | Лист, прутки                       | 270              | 140                  | 80                         | 10           | 12         | 120                             | 170                      | 0,04                    |
|                                                                                                                               | MA13T8           | То же                              | 240              | 180                  | 80                         | 6            | —          | 125                             | —                        | —                       |
|                                                                                                                               | BMД1             | Пруток                             | 300              | 250                  | 180                        | 5            | 10         | 160                             | 160                      | 0,07                    |
| <i>Сверхлегкие сплавы (плотность <math>d = 1400 \div 1600 \text{ кг/м}^3</math>; <math>E = 45 \div 46 \text{ ГПа}</math>)</i> |                  |                                    |                  |                      |                            |              |            |                                 |                          |                         |
| Mg — Li — Zn                                                                                                                  | BMД5             | Пруток, штамповка                  | 160—             | 120—                 | —                          | 15—40        | —          | 130—                            | —                        | 0,25—                   |
|                                                                                                                               |                  |                                    | 220              | 180                  | —                          | —            | —          | 180                             | —                        | 0,9                     |
| Mg — Li — Al — Cd                                                                                                             | IMB-2            | То же                              | 210—             | 160—                 | —                          | 8—20         | —          | 180—                            | —                        | 0,05—                   |
|                                                                                                                               |                  |                                    | 280              | 250                  | —                          | —            | —          | 240                             | —                        | 0,1                     |

Таблица 3.14. Механические свойства магниевых литейных сплавов [3,24]

 $E = 42 \text{ ГПа}; G = 15,5 \text{ ГПа}; \mu = 0,34$ 

| Система легирования         | Сплав, состояние | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_{\text{цц}}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $\sigma_{0,2 \text{ сж}}$ , МПа | $\tau_{\text{ср}}$ , МПа | KCU, МДж/м <sup>2</sup> | HB, МПа |
|-----------------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------|------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|---------|
| <i>Среднепрочные сплавы</i> |                  |                  |                      |                            |              |            |                                 |                          |                         |         |
| Mg — Al — Zn                | ML3              | 180              | 55                   | —                          | 8            | 12         | —                               | 110                      | 0,05                    | 450     |
|                             | ML7-1            | 180              | 70                   | —                          | 6            | 8          | —                               | —                        | 0,03                    | 550     |
| <i>Высокопрочные сплавы</i> |                  |                  |                      |                            |              |            |                                 |                          |                         |         |
| Mg — Al — Zn                | ML4              | 170              | 95                   | —                          | 4            | 6          | —                               | 130                      | 0,02                    | 500     |
|                             | ML4T4            | 235              | 85                   | 18                         | 7            | 15         | —                               | 135                      | 0,04                    | 580     |
|                             | ML4T6            | 240              | 115                  | 45                         | 4            | 6          | —                               | 145                      | 0,02                    | 675     |
|                             | ML5              | 155              | 95                   | —                          | 1,2          | 2,5        | —                               | —                        | —                       | 600     |
|                             | ML5T4            | 240              | 85                   | 30                         | 7            | 15         | 80                              | 135                      | 0,05                    | 580     |
|                             | ML5T6            | 240              | 120                  | 45                         | 3            | 5          | —                               | 140                      | 0,05                    | 675     |
|                             | ML12             | 210              | 105                  | 75                         | 8            | 9          | —                               | 155                      | 0,05                    | 550     |
|                             | ML12T1           | 230              | 130                  | 85                         | 7            | 7          | 130                             | 155                      | 0,04                    | 550     |
| Mg — Zn — La — Zr           | ML12T6           | 250              | 150                  | 85                         | 6,5          | 7          | 130                             | 155                      | 0,04                    | 675     |
|                             | ML15T1           | 215              | 140                  | 80                         | 3,5          | 5          | 140                             | 150                      | 0,02                    | 550     |



| Система легирования       | Сплав, состояние | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_{пл}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $\sigma_{0,2}$ сж, МПа | $\tau_{ср}$ , МПа | KCU, МДж/м <sup>2</sup> | НВ, МПа |
|---------------------------|------------------|------------------|----------------------|---------------------|--------------|------------|------------------------|-------------------|-------------------------|---------|
| <i>Жаропрочные сплавы</i> |                  |                  |                      |                     |              |            |                        |                   |                         |         |
| Mg — Nd — Zr              | МЛ9Т6            | 240              | 145                  | 75                  | 3            | 6          | 140                    | 170               | 0,03                    | 650     |
|                           | МЛ10Т6           | 240              | 120                  | 70                  | 5            | 7,5        | 100                    | 170               | —                       | 650     |
| Mg — Ce — Zn — Zr         | МЛ11             | 130              | 100                  | 40                  | 3            | 3,5        | 100                    | —                 | —                       | 600     |
|                           | МЛ11Т4           | 150              | 90                   | 40                  | 5            | 7          | 90                     | 120               | 0,03                    | 600     |
|                           | МЛ11Т6           | 160              | 105                  | 45                  | 3            | 5          | 105                    | 120               | 0,03                    | 650     |
| Mg — Th — Zn — Zr         | МЛ14Т1           | 200              | 95                   | 50                  | 8            | —          | —                      | —                 | —                       | 600     |
| Mg — Th — Zr              | ВМЛ1Т6           | 200              | 95                   | 50                  | 6            | —          | —                      | —                 | —                       | —       |
|                           | ВМЛ2Т6*1         | 260              | 120                  | 60                  | 6            | 8          | 120                    | 170               | 0,07                    | 650     |

\*1 Не содержит токсичных и радиоактивных добавок

### Медные сплавы и сплавы на основе олова и свинца

Медные сплавы разделяются на две основные группы: латуни и бронзы. Латуни — сплавы, легированные

цинком (табл. 3.15 и 3.16). Различают простые и специальные латуни. Простые латуни (двойные сплавы) маркируют буквой Л, за которой следует содержание меди в процентах. В обозначении специальных латуней после буквы Л следуют заглавные буквы легирующих элемен-

Таблица 3.15. Прочность и пластичность деформируемых латуней [3,24]

Химический состав по ГОСТ 15527—70;  $E = 102 \div 115$  ГПа

| Тип латуни            | Марка латуни                           | Мягкое состояние |              |         | Твердое состояние |              |           |
|-----------------------|----------------------------------------|------------------|--------------|---------|-------------------|--------------|-----------|
|                       |                                        | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ, МПа | $\sigma_B$ , МПа  | $\delta$ , % | НВ, МПа   |
| Простая               | Л96, Л90                               | 240—260          | 50           | 550     | 450—470           | 2,5          | 1350      |
|                       | Л85                                    | 280              | 50           | 570     | 550               | 3,5          | 1400      |
|                       | Л80, Л70                               | 320              | 50—55        | 600     | 655               | 4            | 1450      |
|                       | Л68, Л62                               | 300—320          | 45—55        | 600     | 700               | 4            | 1550      |
|                       | Л63, Л60                               | 400              | 45           | 640     | 705               | 3            | 1600      |
| Алюминиевая           | ЛА85-0,5                               | 300              | 35           | —       | 500               | 10           | —         |
|                       | ЛА77-2                                 | 380              | 50           | 550     | 600               | 9            | 1550      |
|                       | ЛАЖ60-1-1                              | 450              | 50           | 550     | 700               | 8            | 1700      |
|                       | ЛАН59-3-3                              | 550              | 45           | 1150    | 700               | 9            | 1800      |
| Кремнистая            | ЛК80-3                                 | 300              | 55           | 1000    | 650               | 4            | 1800      |
| Марганцовистая        | ЛЖМц59-1-1,<br>ЛМц58-2,<br>ЛМцА-57-3-1 | 380—450          | 40—60        | 800—950 | 680—750           | 5—10         | 1600—1850 |
| Никелевая             | ЛН65-5                                 | 400              | 60           | 600     | 700               | 4,5          | 1650      |
| Оловянистая (морская) | ЛО90-1                                 | 280              | 45           | 570     | 520               | 4,5          | 1450      |
|                       | ЛО70-1                                 | 350              | 60           | 600     | 700               | 4            | 1500      |
|                       | ЛО62-1                                 | 400              | 40           | 800     | 700               | 7            | 1450      |
|                       | ЛО60-1                                 | 380              | 40           | 770     | 580               | 4            | 1500      |
| Свинцовая             | ЛС74-3, ЛС64-2,<br>ЛС63-3              | 300—400          | 40—60        | 500—700 | 550—700           | 2—6          | 1000—1200 |
| Мунц-металл           | ЛС59-1, ЛС60-1                         | 300—450          | 35—55        | 500—800 | 500—650           | 5            | 1200—1600 |

Таблица 3.16. Механические свойства литейных латуней [3,24]

Химический состав — по ГОСТ 15527—70

| Латунь        | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | KCU, МДж/м <sup>2</sup> | НВ, МПа | Латунь        | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | KCU, МДж/м <sup>2</sup> | НВ, МПа |
|---------------|------------------|----------------------|--------------|-------------------------|---------|---------------|------------------|----------------------|--------------|-------------------------|---------|
| ЛА67-2,5      | 380              | 150                  | 15           | —                       | 900     | ЛКС80-3-3     | 340              | 140                  | 20           | 0,4                     | 950     |
| ЛАЖМц66-6-3-2 | 640              | 350                  | 7            | —                       | —       | ЛМцОС58-2-2-2 | 340              | 240                  | 8            | —                       | 950     |
| ЛАЖК60-1-1Л   | 400              | 250                  | 20           | —                       | 900     | ЛМцЖ52-4-1    | 550              | 300                  | 20           | —                       | —       |
| ЛК80-3Л       | 400              | 160                  | 20           | 1,2                     | 1050    | ЛМцЖ55-3-1    | 550              | 250                  | 10           | —                       | 1050    |
| ЛМцС58-2-2    | 360              | 240                  | 10           | 0,7                     | 850     | ЛКС59-1Л      | 340              | 150                  | 40           | 0,26                    | 800     |

Таблица 3.17. Механические свойства деформируемых бронз [3,24]

Химический состав по ГОСТ 5017—74 и ГОСТ 18175—78

| Бронза                   | E, ГПа | Мягкое состояние |              |          | Твердое состояние |              |           |
|--------------------------|--------|------------------|--------------|----------|-------------------|--------------|-----------|
|                          |        | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ, МПа  | $\sigma_B$ , МПа  | $\delta$ , % | НВ, МПа   |
| БрОФ3-0,8, БрОФ7-0,2     | 116,5  | 400—500          | 60           | 850—1000 | 1100—1200         | 1            | 2000—2400 |
| БрОФ6,5-0,4              | 112    | 450              | 60           | 900      | 800               | 7            | 2200      |
| БрОФ4-0,25               | 100    | 340              | 50           | 650      | 600               | 8            | 1650      |
| БрОЦ4-3                  | 124    | 400              | 35           | 700      | 600               | 4,5          | 1600      |
| БрОЦС4-4-2,5, БрОЦС4-4-4 | 73,5   | 350              | 30           | 700      | 600               | 2            | 1600      |
| БрА5                     | 120    | 400              | 65           | 650      | 800               | 4            | 2100      |
| БрА7                     | 120    | 470              | 70           | 750      | 1000              | 3            | 2200      |
| БрАМц9-2                 | 92     | 450              | 30           | 1100     | 800               | 4            | 1800      |
| БрАЖ9-4                  | 115    | 450              | 40           | 1100     | 700               | 4            | 2000      |
| БрЖМц10-3-1,5            | 100    | 500              | 20           | 1400     | 700               | 9            | 2000      |
| БрАЖН10-4-4              | 115    | 550              | 35           | 1500     | 830               | 9            | 2200      |
| БрБ2, БрБНТ1,9, БрБНТ1,7 | 130    | 500              | 40           | 1400     | 900               | 2            | —         |
| БрМц5                    | 105    | 330              | 40           | 800      | 600               | —            | 1700      |
| БрКМц3-1                 | 115    | 400              | 50           | 900      | 750               | 6            | 1700      |
| БрКН1-3                  | —      | 450              | 25           | 1000     | 600               | 6            | 2000      |
| БрХ0,7                   | 135    | 250              | 25           | 700      | 500               | 4,5          | 1400      |

тов и содержание меди в процентах, затем через тире — процентное содержание каждого легирующего элемента. Бронзы — сплавы, легированные различными элементами, за исключением цинка (табл. 3.17 и 3.18). Название

бронза получает по основному легирующему элементу: так, сплав меди с алюминием называется алюминиевой бронзой, сплав меди со свинцом — свинцовой и т. д. Маркируют бронзы буквой Бр, в остальном повторяется система маркировки латуней. Сплавы, в которых основным легирующим элементом является никель, именуются медно-никелевыми и имеют специальные названия

Таблица 3.18. Механические свойства литейных бронз [3,24]

Химический состав — по ГОСТ 613—79

| Бронза                  | Литье в кокиль   |              |         | Литье в землю    |              |         |
|-------------------------|------------------|--------------|---------|------------------|--------------|---------|
|                         | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ, МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | НВ, МПа |
| БрОЦСН3-7-5-1           | 210              | 5            | 600     | 180              | 8            | 600     |
| БрОЦС3-12-5, БрОЦС5-5-5 | 180              | 4            | 600     | 150              | 6            | 600     |
| БрОЦС3-5-7-5, БрОФ10-1  | 250              | 3            | 900     | 220              | 3            | 800     |
| БрОЦ10-2                | 230              | 5            | 750     | 220              | 8            | 700     |
| БрОЦ5-25                | 140              | 6            | 500     | 120              | 4            | 400     |
| БрАЖ9-4Л                | 400              | 10           | 1000    | 500              | 12           | 1000    |
| БрАЖМц10-3-1,5          | 400              | 12           | 1200    | —                | —            | —       |
| БрАЖН11-6-6             | 600              | 2            | 2500    | 600              | 2            | 2500    |
| БрСуН6-2                | 260              | 6            | 810     | —                | —            | —       |
| БрСуФ6-1                | 220              | 5            | 800     | —                | —            | —       |
| БрСуСФ6-12-0,3          | 150              | 2            | 600     | —                | —            | —       |

Таблица 3.19. Механические свойства медно-никелевых сплавов [3,24]

Химический состав — по ГОСТ 492—73

| Название   | Сплав         | E, ГПа | Мягкое состояние |              | Твердое состояние |              |
|------------|---------------|--------|------------------|--------------|-------------------|--------------|
|            |               |        | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_B$ , МПа  | $\delta$ , % |
| Мельхиор   | МНЖМц30-0,8-1 | 145    | 400              | 45           | 600               | 4,0          |
| »          | МН19          | 140    | 350              | 40           | 550               | 4,0          |
| Нейзильбер | МНЦ15-20      | 140    | 425              | 45           | 650               | 2,5          |
| »          | МНЦ16-29-1,8  | 125    | 400              | 42           | 650               | 3,0          |
| Куниаль    | МНА13-3       | —      | 420              | 12           | 900               | 3,0          |
| »          | МНА6-1,5      | —      | 400              | 35           | 700               | 5,0          |
| Копель     | МНМц43-0,5    | 120    | 420              | 38           | 650               | 3,5          |
| Константан | МНМц40-1,5    | 165    | 430              | 28           | 670               | 2,5          |

(табл. 3.19). Деформируемые медные сплавы поставляются в мягком (отожженном и закаленном), полутвердом (обжатие 10—30%), твердом (обжатие 30—50%) и особо твердом (обжатие более 60%) состояниях.

Сплавы на основе олова или свинца — баббиты — маркируются буквой Б, за которой следует цифра, обозначающая содержание олова в сплаве (табл. 3.20).

Таблица 3.20. Механические свойства баббитов [3]

| Сплав, | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_{B, сж}$ , МПа | $\sigma_{0,2сж}$ , МПа | Укорочение при сжатии, % | НВ, МПа | KCU, МДж/м <sup>2</sup> |
|--------|------------------|----------------------|--------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------------------------|
|--------|------------------|----------------------|--------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------|-------------------------|

Оловянистые баббиты,  
химический состав — по ГОСТ 1320—71

|     |    |   |   |     |    |    |     |      |
|-----|----|---|---|-----|----|----|-----|------|
| В89 | 80 | — | 9 | 100 | 50 | 40 | 250 | 0,08 |
| В83 | 90 | — | 6 | 115 | 72 | 38 | 300 | 0,06 |

Свинцовооловянистые баббиты,  
химический состав — по ГОСТ 1320—74

|      |    |    |      |     |   |    |     |       |
|------|----|----|------|-----|---|----|-----|-------|
| Б16  | 78 | 76 | 0,2  | 123 | — | 15 | 300 | 0,014 |
| БН*  | 70 | 70 | 1,0  | 107 | — | 25 | 290 | 0,03  |
| БТ** | 67 | 54 | 11,5 | 103 | — | —  | 220 | 0,05  |
| Б6   | 68 | —  | 0,2  | 120 | — | 23 | 300 | 0,015 |

Кальциевые баббиты  
химический состав — по ГОСТ 1208—78

|     |     |     |     |     |   |    |     |      |
|-----|-----|-----|-----|-----|---|----|-----|------|
| ДК  | 118 | 100 | 2,5 | 160 | — | 19 | 320 | 0,08 |
| БК2 | 95  | 80  | 8   | —   | — | —  | 200 | 0,12 |

\* Содержит никель.

\*\* Содержит теллур.

### Жаропрочные сплавы и сплавы на основе тугоплавких металлов

Таблица 3.21. Механические свойства жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов [3,24]

| Сплавы, система легирования                                    | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % |
|----------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|
| 1. Никелевые сплавы:<br>деформируемые после закалки и старения |                  |                      |              |            |
| ХН77ТЮ                                                         | 1000             | 600                  | 25           | 28         |
| ХН77ТЮР                                                        | 1000             | 650                  | 20           | 21         |
| ХН70ВМТЮ                                                       | 1150             | 750                  | 14           | 15         |
| ХН70МВТЮБ                                                      | 1050             | 700                  | 16           | 16         |
| ХН67МТЮБ                                                       | 1050             | 650                  | 25           | 25         |
| литейные после нормализации                                    |                  |                      |              |            |
| ВЛ7-45У                                                        | 500              | —                    | 5            | 9          |
| ЖСЗ                                                            | 740              | —                    | 8            | 14         |
| ЖСЗДК                                                          | 1050             | —                    | 8            | 13         |
| ЖС6                                                            | 1050             | —                    | 1            | 2          |
| ЖС6К                                                           | 1000             | —                    | 2,5          | 6          |
| ЭП23                                                           | 1250             | —                    | 2,5          | 11         |

Продолжение табл. 3.21

| Сплавы, система легирования                   | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % |
|-----------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|
| деформируемые жаростойкие после нормализации  |                  |                      |              |            |
| ХН78Т                                         | 780              | 275                  | 40           | —          |
| ХН75МБТЮ                                      | 850              | 400                  | 45           | —          |
| ХН60В                                         | 800              | 320                  | 60           | —          |
| ХН70Ю                                         | 720              | —                    | 75           | —          |
| ХН60Ю                                         | 710              | —                    | 60           | —          |
| 2. Кобальтовые литейные сплавы после старения |                  |                      |              |            |
| ЛК4*                                          | 700              | —                    | 8            | 10         |
| ЛК4Я                                          | 900              | —                    | 5            | 5          |
| 4К66Я                                         | 900              | —                    | 6            | 7          |

\* Литое состояние.

Таблица 3.22. Прочность и пластичность сплавов на основе тугоплавких металлов [3, 6, 24]

| Основа   | Сплав, система легирования, состояние                                           | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| Вольфрам | W—30Re, рекристаллизованное                                                     | 1400             | 5            |
|          | W—30Re, нерекристаллизованное                                                   | 2200             | 6            |
| Молибден | ВМ1 (Mo—Ti—Zr—Nb), ЦМ2А (Mo—Ti—Zr), ЦМ6 (Mo—Zr), ВМ2 (Mo—Ti—Zr—Nb) после отжига | 800              | —            |
|          | МР47ВР (Mo—47Re)                                                                | 1750             | —            |
| Ниобий   | ВН-2 (Nb—Mo), деформированное                                                   | 750              | 23           |
|          | ВН2А (Nb—Mo—Zr), деформированное                                                | 850              | 4,5          |
|          | ВН-3 (Nb—Mo—Zr), деформированное                                                | 780              | 18           |
|          | ВН-4 (Nb—Mo—Zr—La или Ce), рекристаллизованное                                  | 800              | 16           |
|          | ВН-5А (Nb—Mo—Zr—La или Ce), рекристаллизованное                                 | 600              | 27           |
|          | РН-6(Nb—Mo—W—Zr), рекристаллизованное                                           | 890              | —            |
|          | МН-1, рекристаллизованное                                                       | 670              | 18           |
|          | МН-1, закаленное                                                                | 760              | 17           |
|          | МН-2, рекристаллизованное                                                       | 1050             | 4            |
| Тантал   | Та—10W, рекристаллизованное                                                     | 950              | 25           |
|          | Та—10W, деформированное                                                         | 1350             | 3            |
| Хром     | ВХ2, ВХ2И                                                                       | 400              | —            |
|          | ВХ4                                                                             | 1100             | —            |

## Композиционные материалы

Композиционные материалы имеют ориентированную структуру и могут быть разделены на волокнистые материалы, матрица которых содержит упрочняющие однородные наполнители (волокна, проволоки, нитевидные

кристаллы), на слоистые композиции — набор чередующихся жестко связанных двумерных армирующих элементов (листов, фольг и т. п.) и на дисперсно-упрочненные материалы, содержащие равномерно распределенные и не растворяющиеся в несущей матрице ультрадисперсные частицы.

Таблица 3.23. Механические свойства композиционных материалов однонаправленной структуры на полимерной матрице [12, 13]

| Наполнитель          | Матрица     | Объемное содержание наполнителя, % | $\rho$ , кг/м³ | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{в.сж}$ , МПа | $\sigma_{в.изг}$ , МПа | $\tau_{сдв}^*$ , МПа | $E$ , ГПа | KCU, МДж/м² | $\delta_p$ , % |
|----------------------|-------------|------------------------------------|----------------|------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------|-------------|----------------|
| Борное волокно       | Эпоксидная  | 50                                 | 2000           | 1600             | 2500                  | 1600                   | 100                  | 210       | 0,06        | 0,4            |
|                      | Полиамидная | 50                                 | 2000           | 1000             | 1250                  | 1550                   | 60                   | 250       | 0,11        | —              |
| Углеродная лента     | Эпоксидная  | 50                                 | 1400           | 800              | 400                   | 1000                   | 30                   | 120       | 0,05        | 0,5            |
|                      | Полиамидная | 52,5                               | 1300           | 400              | 300                   | 800                    | 26                   | 80        | 0,04        | —              |
| Углеродный жгут      | Эпоксидная  | 60                                 | 1500           | 1100             | 450                   | 1300                   | 45                   | 180       | 0,045       | —              |
|                      | Полиамидная | 57,5                               | 1400           | 910              | 400                   | 1100                   | 30                   | 140       | 0,04        | —              |
| Органическое волокно | Эпоксидная  | 70                                 | 1350           | 1800             | 290                   | 675                    | 49                   | 80        | —           | 2,3            |
| Стеклоанное волокно  | »           | 75                                 | 2000           | 1800             | 700                   | 900                    | 30                   | 55        | —           | 3              |

\* При межслойном сдвиге.

Таблица 3.24. Механические свойства композиционных материалов однонаправленной структуры на металлической матрице [5, 13, 14, 24]

| Наполнитель        | Матрица        | Объемное содержание наполнителя, % | $\rho$ , кг/м³ | $\sigma_B$ , МПа | $E$ , ГПа | Наполнитель                           | Матрица                  | Объемное содержание наполнителя, % | $\rho$ , кг/м³ | $\sigma_B$ , МПа | $E$ , ГПа |
|--------------------|----------------|------------------------------------|----------------|------------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-----------|
| Борное волокно     | Алюминий       | 50                                 | 2600           | 1350             | 240       | Бериллиевая проволока                 | Сплав Al—Mg—Si           | 50                                 | 2300           | 680              | 195       |
| То же              | Сплав Al—Mg—Si | 50                                 | 2600           | 1450             | 240       | Молибденовая проволока                | Сплав Ti—Al—V            | 30                                 | 6250           | 1400             | 195       |
| »                  | Магний         | 50                                 | 2150           | 1200             | 220       | Вольфрамовая проволока                | Никелевый литейный сплав | 50                                 | 14000          | 700              | —         |
| »                  | Магний литой   | 75                                 | 2400           | 1350             | 335       | Вольфрамовая проволока                | Алюминий                 | 50                                 | 2450           | 800              | —         |
| Углеродное волокно | Алюминий       | 40—50                              | 2200—2400      | 650—1250*        | 125—260*  | Нитевидные кристаллы SiO <sub>2</sub> | Алюминий                 | 50                                 | 2450           | 800              | —         |
| То же              | Никель         | 50                                 | 5300           | 560              | 240       | Частицы NiO <sub>2</sub> **           | Никель*                  | 2,5                                | 8900           | 510              | —         |
| »                  | Цинк           | 35                                 | 5260           | 780              | 120       | Волокна SiC                           | Титан                    | 25                                 | 4300           | 940              | 210       |
| »                  | Свинец         | 40                                 | 7350           | 730              | 205       |                                       |                          |                                    |                |                  |           |
| Стальная проволока | Алюминий       | 40                                 | 4740           | 1500             | 120       |                                       |                          |                                    |                |                  |           |
|                    |                | 15                                 | 3470           | 850              | 90        |                                       |                          |                                    |                |                  |           |

\* В зависимости от типа углеродного волокна.

\*\* Дисперсно-упрочненный материал.

**Пластмассы, металлокерамика и другие материалы**

Т а б л и ц а 3.25. Механические свойства пластмасс [3,24]

| Пластмасса                                  | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{B, изг}$ , МПа | $\sigma_{B, сж}$ , МПа | $E$ , ГПа | $\delta_p$ , % | KCU, 10 <sup>2</sup> МДж/м <sup>2</sup> |
|---------------------------------------------|----------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|-----------|----------------|-----------------------------------------|
| Асботекстолит                               | 1700                       | 65               | 100                     | 145                    | 15        | —              | 3                                       |
| Винипласт                                   | 1400                       | 50               | 110                     | 90                     | 4,0       | 30             | 15                                      |
| Гетинакс                                    | 1350                       | 160              | 140                     | —                      | 1,5       | —              | 1,4                                     |
| Дифлон                                      | 1200                       | 70               | 105                     | 85                     | —         | 50             | 13                                      |
| Капрон                                      | 1140                       | 55               | 95                      | 90                     | 1,0       | 100            | 11                                      |
| Капрон вторичный                            | 1150                       | 35               | 45                      | 60                     | —         | —              | 2,5                                     |
| Капрон, полиамид, анид<br>стеклонаполненный | 1350                       | 130              | 200                     | 115                    | 6,5       | 2              | 2,5                                     |
| Пенопласт ПС-1                              | 100                        | —                | —                       | 1                      | 0,05      | —              | 0,11                                    |
| Пенопласт ПХВ-1                             | 200                        | 4,5              | 4                       | 2,6                    | 0,18      | 6              | 0,15                                    |
| Пенопласт ФК-20-СТ<br>стеклонаполненный     | 450                        | 10               | —                       | 24                     | —         | —              | 0,7                                     |
| Пенополиуретан ПУ101Т                       | 200                        | —                | —                       | 3,3                    | —         | —              | 0,04                                    |
| Полиамид П-68                               | 1110                       | 50               | 80                      | 90                     | 1,5       | 100            | 15                                      |
| Полиамид, наполненный<br>тальком и графитом | 1140                       | 60               | 80                      | 80                     | 1,15      | 100            | 10                                      |
| Полипропилен                                | 910                        | 32               | 75                      | 100                    | 1,15      | 600            | —                                       |
| Полистирол                                  | 1050                       | 35               | 100                     | 100                    | 2,5       | 1,5            | 2                                       |
| Политетрафторэтилен<br>(Фторопласт-4)       | 2200                       | 20               | 12,5                    | —                      | 0,45      | 300            | 10                                      |
| Политетрахлорэтилен<br>(Фторопласт-3)       | 2120                       | 37               | 70                      | 50                     | 1,15      | 30             | 2—16                                    |
| Полиуретан                                  | 1200                       | 55               | 75                      | —                      | 0,01      | 55             | 1,1                                     |
| Полиэтилен ВД                               | 920                        | 14               | 15                      | 12                     | 0,2       | 150            | —                                       |
| Полиэтилен НД                               | 950                        | 22—32            | 20—35                   | 20—35                  | 0,7       | 200            | —                                       |
| Пресс-материал                              | 1400                       | 50               | 60                      | 200                    | 5         | —              | 1,2                                     |
| Стекло органическое:<br>неориентированное   | 1200                       | 75               | 105                     | —                      | 3         | 4              | 1,3                                     |
| ориентированное СОЛ,<br>СТ-1                | 1200                       | 80               | 105                     | —                      | 3         | 20             | 3                                       |
| ориентированное 2-55,<br>Т2-55              | 1200                       | 105              | 150                     | —                      | 4         | 3              | 3                                       |
| Стекловолокнит АГ                           | 1700                       | 405              | 410                     | 260                    | 22        | —              | 15                                      |
| Стеклопластик СВМ                           | 1900                       | 460              | 460                     | 420                    | 35        | —              | 30                                      |
| Стеклотекстолит КА СТ-В                     | 1900                       | 320              | 150                     | 110                    | 20        | 0,8            | 8                                       |
| Стеклотекстолит<br>ЭФ 32-301                | 1800                       | 400              | 400                     | 255                    | 21        | —              | 15                                      |
| Стеклотекстолит ВФТ-С                       | 1800                       | 350              | 330                     | 170                    | 21        | —              | 15                                      |
| Текстолит ПТ                                | 1300                       | 85               | 140                     | 130                    | 10        | 1              | 3,5                                     |
| Этрол ацетицеллюлоз-<br>ный                 | 1400                       | 55               | 50                      | 55                     | 2,25      | 7              | 2                                       |
| Этрол нитроцеллюлозный                      | 1900                       | 30               | 35                      | 20                     | 2,3       | 25—50          | 0,6                                     |
| Этрол этилцеллюлозный                       | 1200                       | 12               | 34                      | 17                     | 2,2       | 50—100         | 1,5                                     |

Т а б л и ц а 3.26. Механические свойства металлокерамики\* [3,24]

| Тип сплава                 | Металлокерамика,<br>композиция                         | $\sigma_B$ , МПа, при |        |         | $\phi$ , % | НВ, МПа |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|--------|---------|------------|---------|
|                            |                                                        | растяже-<br>ний       | сжатии | изгибе  |            |         |
| Сплавы на основе<br>железа | Спеченное железо                                       | 195                   | 300    | —       | 4          | 540     |
|                            | То же после деформации 69—70%                          | 275                   | 370    | —       | 6          | 760     |
|                            | Спеченная углеродистая сталь                           | 300                   | 540    | —       | 5          | 960     |
|                            | Спеченная нержавеющая сталь после<br>деформации 60—70% | 565                   | 720    | —       | 16         | 1600    |
| Твердые сплавы             | Сплав 22Fe + 20Ni + Mo                                 | 1000                  | 1650   | —       | 7          | 2700    |
|                            | WC—Co: BK2, BK3, BK8                                   | —                     | —      | 1000    | —          | 900     |
|                            | BK10, BK11, BK15                                       | —                     | —      | 1500    | —          | 900     |
|                            | WC—TiC—Co: T5K10, T14K8, T15K8                         | —                     | —      | 1100    | —          | 900     |
|                            | T30K4, T60K6                                           | —                     | —      | 750—900 | —          | 900     |

\* Изготавливаются методом порошковой металлургии.

| Тип сплава                | Металлокерамика, композиция             | $\sigma_B$ , МПа, при |         |        | $\psi$ , % | НВ, МПа |
|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|---------|--------|------------|---------|
|                           |                                         | растяже-<br>нии       | сжатии  | изгибе |            |         |
| Тяжелые сплавы<br>Фильтры | W—Co—Ni(Cu, Cr)                         | 1000                  | 2800    | —      | —          | 2250    |
|                           | Бронза Cu—Sn                            | 30—40                 | 100—120 | —      | 3          | —       |
|                           | Низкоуглеродистая сталь                 | 1—7                   | 30—250  | —      | —          | —       |
| Керметы                   | Нержавеющая сталь                       | 5—120                 | —       | —      | 0,8        | —       |
|                           | 70Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30Cr | 250                   | 2300    | 390    | —          | —       |
|                           | 80TiC + 20Co                            | —                     | 3150    | 1050   | —          | —       |

Таблица 3.27. Механические свойства керамики [3, 24]

| Керамика                                  | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , МПа, при |        |         | E, ГПа |
|-------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------|---------|--------|
|                                           |                            | растяжении            | изгибе | сжатии  |        |
| Глиношамотная с грубозернистой структурой | 2100                       | 6—10                  | 10—20  | 30—90   | —      |
| Глиношамотная с тонкозернистой структурой | 2170                       | 25                    | 25—70  | 80—150  | —      |
| Фарфор                                    | 2350                       | 30—60                 | 50—120 | 400—500 | —      |
| Каменное литье                            | 2900                       | —                     | 40—65  | 330—450 | 90     |
| Керамика из оксидов:                      |                            |                       |        |         |        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (корунд)   | 3990                       | 260                   | 150    | 4000    | 382    |
| Be <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | 3020                       | 105                   | —      | 2100    | 272    |
| MgO                                       | 3580                       | 98                    | 110    | 1400    | 214    |
| ZrO <sub>2</sub>                          | 5600                       | 148                   | 233    | 2100    | 172    |
| ThO <sub>2</sub>                          | 9690                       | 100                   | —      | 1500    | 140    |

Таблица 3.28. Механические свойства неорганических стекол и ситаллов [3, 24]

| Стекло, ситалл         | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , МПа, при |        |         | $E$ , ГПа |
|------------------------|----------------------------|-----------------------|--------|---------|-----------|
|                        |                            | растяжении            | изгибе | сжатии  |           |
| Стекло:                |                            |                       |        |         |           |
| кварцевое непрозрачное | 2100                       | 40                    | 45     | 350     | 0,6       |
| кварцевое прозрачное   | 2200                       | 60                    | 110    | 650     | 0,65      |
| электровакуумное       | 2100—2500                  | 50—100                | —      | 800—200 | 0,65      |
| электроизоляционное    | 2500                       | —                     | 40—65  | —       | 0,7       |
| Ситалл:                |                            |                       |        |         |           |
| магнесиальный          | 2500—2850                  | —                     | 160    | —       | 0,12      |
| пироксеновый           | 2900                       | —                     | 400    | —       | 0,14      |

Таблица 3.29. Механические свойства резин [3]

| Резина                                  | $\sigma_B$ , МПа | $\delta_p$ , % | Резина                                           | $\sigma_B$ , МПа | $\delta_p$ , % |
|-----------------------------------------|------------------|----------------|--------------------------------------------------|------------------|----------------|
| Амортизационная                         | 10—16            | 400—600        | Маслостойкая мягкая:                             | 4—12             | 250—600        |
| Губчатая                                | 0,02—0,1         | —              | » средней твердости                              | 4—16             | 200—350        |
| Ячеистая и пористая из твердых каучуков | 0,01—5           | 20—300         | » твердая                                        | 4—20             | 120—300        |
| Кислото- и щелочестойкая:               |                  |                | Морозостойкая на основе СК МС-10                 | 15               | 200            |
|                                         | на основе СКБ    | 4,5—10         | 200—350                                          | 13               | —              |
|                                         | на основе СКС    | 20—25          | 300—500                                          |                  |                |
|                                         | на основе ХП     | 18—24          | 200—500                                          |                  |                |
|                                         |                  |                | Стойкая к гидравлическим жидкостям на основе СКН |                  |                |

# Минералы и волокна

Таблица 3.30. Твердость минералов

| Минерал             | Состав, химическая формула                                                                                                               | Твердость по шкале Мооса | Другие свойства                                                                                                        |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Агат                | $\text{SiO}_2$                                                                                                                           | 6,5                      | $E = 98 \text{ ГПа}$                                                                                                   |
| Азурит              | $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$                                                                                            | 3,5                      | —                                                                                                                      |
| Алмаз               | C                                                                                                                                        | 10                       | $E = 740 \div 1000 \text{ ГПа}; \sigma_B = 240 \div 480 \text{ МПа}; H_\mu = 10\,000 \text{ ГПа}$                      |
| Альмадин (гранат)   | $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$                                                                                                 | 8                        | $H_\mu = 1230 \text{ ГПа}$                                                                                             |
| Аидрадит (гранат)   | $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$                                                                                                 | 7                        | —                                                                                                                      |
| Андалузит           | $\text{Al}_2\text{SiO}_5$                                                                                                                | 7                        | —                                                                                                                      |
| Барит               | $\text{BaSO}_4$                                                                                                                          | 3,5                      | —                                                                                                                      |
| Берилл              | $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$                                                                                       | 8                        | $H_\mu = 1120 \div 1450 \text{ ГПа}$                                                                                   |
| Виллемит            | $\text{Zn}_2[\text{SiO}_4]$                                                                                                              | 5,5                      | —                                                                                                                      |
| Волластонит         | $\text{CaSiO}_2$                                                                                                                         | 4,5                      | $\sigma_{B, \text{изг}} = 1120 \div 1450 \text{ ГПа}$                                                                  |
| Галенит             | PbS                                                                                                                                      | 2,5                      | —                                                                                                                      |
| Галлит              | NaCl                                                                                                                                     | 2                        | —                                                                                                                      |
| Гематит             | $\text{FeSiO}_2$                                                                                                                         | 6                        | —                                                                                                                      |
| Гипс                | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                                                                                | 2                        | —                                                                                                                      |
| Горный хрусталь     | $\text{SiO}_2$                                                                                                                           | 7                        | —                                                                                                                      |
| Графит              | C                                                                                                                                        | 1,5                      | $\sigma_B = 4,5 \div 6 \text{ МПа}; \sigma_{B, \text{сж}} = 15 \div 29 \text{ МПа}; H_\mu = 6,8 \div 11,8 \text{ ГПа}$ |
| Гроссуляр (гранат)  | $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$                                                                                                 | 7                        | —                                                                                                                      |
| Кальцит             | $\text{CaCO}_3$                                                                                                                          | 3                        | —                                                                                                                      |
| Кварц               | $\text{SiO}_2$                                                                                                                           | 7                        | $H_\mu = 1100 \text{ ГПа}$                                                                                             |
| Кианит              | $\text{Al}_2\text{SiO}_5$                                                                                                                | 6                        | —                                                                                                                      |
| Корунд              | $\text{Al}_2\text{O}_3$                                                                                                                  | 9                        | $H_\mu = 2050 \text{ ГПа}$                                                                                             |
| Крокидолит-асбест   | $3\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{Na}_2\text{O} \cdot 6(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 17\text{SiO}_2$ | 4                        | —                                                                                                                      |
| Лазурит             | $(\text{Na}, \text{Ca})_{1-8} [\text{AlSiO}_4]_6 [\text{SO}_4 \text{ Cl}, \text{Si}]_{1-2}$                                              | 5,5                      | —                                                                                                                      |
| Магнезит            | $\text{MgCO}_3$                                                                                                                          | 4                        | $\sigma_{B, \text{сж}} = 88,5 \text{ МПа}$                                                                             |
| Малахит             | $\text{Cu}_2 [\text{CO}_3] (\text{OH})_2$                                                                                                | 4                        | —                                                                                                                      |
| Миллерит            | NiS                                                                                                                                      | 4                        | —                                                                                                                      |
| Муллит              | $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$                                                                                             | 6                        | $E = 35 \text{ ГПа}$                                                                                                   |
| Мусковит            | $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$                                                                                  | 2,5                      | $\sigma_B = 170 \div 355 \text{ МПа}; \sigma_{B, \text{сж}} = 420 \div 540 \text{ МПа}$                                |
| Опал                | $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$                                                                                                  | 6                        | —                                                                                                                      |
| Перовскит           | $\text{CaTiO}_3$                                                                                                                         | 6                        | —                                                                                                                      |
| Пирролюзит          | $\text{MnO}_2$                                                                                                                           | 5,5                      | —                                                                                                                      |
| Пироп (гранат)      | $\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$                                                                                                 | 7                        | —                                                                                                                      |
| Пирофиллит          | $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] [\text{OH}]_2$                                                                                    | 1,5                      | —                                                                                                                      |
| Реальгар            | AsS                                                                                                                                      | 2                        | —                                                                                                                      |
| Рутил               | $\text{TiO}_2$                                                                                                                           | 6                        | —                                                                                                                      |
| Сепиолит            | $2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$                                                                              | 2,5                      | —                                                                                                                      |
| Силлиманит          | $\text{Al}_2\text{SiO}_5$                                                                                                                | 7                        | $\sigma_{B, \text{сж}} = 45 \div 60 \text{ МПа}$                                                                       |
| Спессартин (гранат) | $\text{Mn}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$                                                                                                 | 7                        | —                                                                                                                      |
| Тальк               | $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}] [\text{OH}]_2$                                                                                    | 1                        | —                                                                                                                      |
| Топаз               | $\text{Al}_2[\text{SiO}_4] [\text{FeOH}]_2$                                                                                              | 8                        | —                                                                                                                      |
| Турмалин            | $[\text{Ni}, \text{Ca}] (\text{NaAl})_6 [\text{Si}_6\text{Al}_3\text{B}_3 (\text{O}, \text{OH})_{30}]$                                   | 7                        | —                                                                                                                      |
| Уваровит (гранат)   | $\text{Ca}_3\text{Cr}_2[\text{SiO}_4]_3$                                                                                                 | 7                        | —                                                                                                                      |
| Флогопит            | $\text{KMg}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] [\text{Fe}, \text{OH}]_2$                                                                      | 2,5                      | $\sigma_{B, \text{сж}} = 205 \div 265 \text{ МПа}$                                                                     |
| Флюорит             | $\text{CaF}_2$                                                                                                                           | 4                        | —                                                                                                                      |
| Хризоберилл         | $\text{Al}_2\text{BeO}_4$                                                                                                                | 8,5                      | —                                                                                                                      |
| Хризотил-асбест     | $\text{H}_4\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_9$                                                                                             | —                        | $E = 158 \div 210 \text{ ГПа}; \sigma_{B, \text{сж}} = 590 \div 785 \text{ МПа}$                                       |
| Циркон              | $\text{ZrSiO}_4$                                                                                                                         | 7,5                      | —                                                                                                                      |
| Шеелит              | $\text{CaWO}_4$                                                                                                                          | 5                        | —                                                                                                                      |
| Шорломит (гранат)   | $\text{Ca}_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Ti}) (\text{Si}, \text{Ti})\text{O}_4]_3$                                                       | 7                        | —                                                                                                                      |

Таблица 3.31. Механические свойства волокон [3]

| Волокно                         | $L_p \cdot 10^{-3}$ м<br>в сухом<br>состоянии | Потери проч-<br>ности в мок-<br>ром состоя-<br>нии, % | Удлинение, %, в состоянии |         | $\sigma_B$ , МПа | $E$ , ГПа |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|---------|------------------|-----------|
|                                 |                                               |                                                       | сухом                     | мокроем |                  |           |
| Натуральные волокна             |                                               |                                                       |                           |         |                  |           |
| Асбест                          | —                                             | —                                                     | —                         | —       | 300              | 155—205   |
| Бамбук                          | —                                             | —                                                     | —                         | —       | 345              | 33        |
| Лен:                            |                                               |                                                       |                           |         |                  |           |
| технический                     | 40                                            | 0                                                     | 2—3                       | 2—3     | 490—590          | —         |
| элементарный                    | 63                                            | 0                                                     | 2—2,5                     | 2—2,5   | 785—980          | —         |
| Хлопок:                         |                                               |                                                       |                           |         |                  |           |
| средневолокнистый               | 24                                            | 0                                                     | 6—8                       | 7—9     | 245—390          | —         |
| тонковолокнистый                | 35                                            | 0                                                     | 6—8                       | 7—9     | 390—540          | —         |
| Шелк                            | 35                                            | 20—30                                                 | 15—20                     | 20—25   | 440—490          | —         |
| Шерсть:                         |                                               |                                                       |                           |         |                  |           |
| грубая                          | 12                                            | 30—35                                                 | 25—30                     | 25—35   | 145—195          | —         |
| тонкая                          | 14                                            | 30—35                                                 | 30—50                     | —       | 195—245          | —         |
| Химические волокна              |                                               |                                                       |                           |         |                  |           |
| Альгинат                        | 10—14                                         | 60—70                                                 | 10—14                     | 25—26   | —                | —         |
| Ацетат (виполян, викара, адрил) | 11—14                                         | 40—45                                                 | 22—30                     | 28—35   | 175—215          | —         |
| Белковое (казеин)               | 7—13                                          | 40—60                                                 | 30—50                     | 50—70   | 90—155           | —         |
| Винилон, винил                  | 80—100                                        | 10—15                                                 | 8—10                      | 13—18   | 1030—1270        | 2,5—10,8  |
| Вискозное кордное:              |                                               |                                                       |                           |         |                  |           |
| обычное                         | 27—30                                         | 35—40                                                 | 10                        | 16      | 340—390          | 3,9—5,9   |
| высокопрочное                   | 40—55                                         | 25—30                                                 | 15                        | 25      | 640—735          | 11,8—24,5 |
| Вискозное:                      |                                               |                                                       |                           |         |                  |           |
| медноаммиачное                  | 15—23                                         | 35—40                                                 | 10—17                     | 15—30   | 225—315          | —         |
| штапельное                      | 15—20                                         | 55                                                    | 20—25                     | 20—30   | 225—300          | —         |
| Ветрелон (полиамидное)          | 23—29                                         | 6                                                     | 13—18                     | 15—19   | —                | 2,7       |
| Гидратцеллюлоза                 | 30—40                                         | 20                                                    | 8—10                      | 12—13   | —                | 8—9,8     |
| Капрон, нейлон, дедерон         | 40—50                                         | 10                                                    | 20—25                     | —       | 480—625          | —         |
| Лавсан                          | 45—55                                         | 0                                                     | 9—12                      | 15—18   | 450—540          | —         |
| Нитрон, орлон                   | 45—55                                         | 2—6                                                   | 14—17                     | 14—16   | 510—610          | —         |
| Совиден                         | 16—36                                         | 0                                                     | 15—25                     | —       | 260—590          | —         |
| Триацетат, арнел, курплет       | 10—15                                         | 20—25                                                 | 20—23                     | 35—40   | 135              | 4,5       |
| Фторлон                         | 45—55                                         | 0                                                     | 6—9                       | 6—9     | 880—1050         | 14,7      |

Таблица 3.32. Механические свойства волокон, проволоки и нитевидных кристаллов для армирования композиционных высокопрочных и высокомодульных материалов [14, 15, 24]

| Волокно, проволока, кристалл | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , ГПа | $E$ , ГПа | $\delta_p$ , % | Волокно, проволока, кристалл  | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , ГПа | $E$ , ГПа | $\delta_p$ , % |
|------------------------------|----------------------------|------------------|-----------|----------------|-------------------------------|----------------------------|------------------|-----------|----------------|
| Волокно:                     |                            |                  |           |                | стальная                      | 7800                       | 3,5—4            | 200       | 2—2,5          |
| борное                       | 2630                       | 2,5—3,5          | 380—450   | 0,7—0,8        | титановая                     | 4500                       | 1,5—2            | 120       | 1,8—2          |
| углеродное                   | 1700                       | 2—3,2            | 200—500   | 0,7—1,0        | молибденовая                  | 10 000                     | 1,75             | 350       | 1,3            |
| стеклянное                   | 2540                       | 3,9—4,6          | 95—100    | 4—5            | Нитевидные кристаллы («усы»): |                            |                  |           |                |
| органическое                 | 1350                       | 2,8—3,5          | 120—130   | 2—2,5          |                               |                            |                  |           |                |
| карбида крем-<br>ния         | 3210                       | 2—4              | 400—500   | 0,3—0,5        |                               |                            |                  |           |                |
| оксида алюми-<br>ния         | 3960                       | 2,1—2,6          | 500       | —              |                               | 2260                       | 21               | 100       | —              |
| оксида цирко-<br>ния         | 6270                       | 2,4—2,7          | 480       | —              |                               | 3960                       | 28—42            | 500       | —              |
| Проволока:                   |                            |                  |           |                |                               | 3300                       | 15               | 380       | —              |
| бериллиевая                  | 1840                       | 1—1,5            | 290—320   | —              |                               | 3210                       | 21—37            | 580       | —              |
| вольфрамовая                 | 19 300                     | 2,4—4,2          | 400       | 2—3            |                               | 3180                       | 15               | 495       | —              |



### 3.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Механические свойства при температуре ниже 20 °С определяются по ГОСТ 11150—84, выше 20 °С — по ГОСТ 9651—84. Методы определения ползучести и длительной прочности регламентируются ГОСТ 3248—81 и ГОСТ 10145—80 соответственно.

Температурные зависимости механических свойств для каждого класса материалов достаточно близки. Наиболее чувствительны к влиянию температуры свойства, характеризующие сопротивление пластической деформации (твердость, пределы прочности и текучести), а также ударная вязкость. Упругие свойства металлов и сплавов изменяются с температурой в меньшей степени. Напротив, модуль упругости некоторых неметаллических материалов с понижением температуры до —60 °С может снижаться более чем в 2 раза.

В табл. 3.33—3.46 и на рис. 3.2—3.21 при температурах от —253 до +2400 °С приведены характеристики  $E$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$  и КСЧ, определение которых дано в § 3.1, а также  $\sigma_{0,2/\tau}^t$  и  $\sigma_{\tau}^t$  при высоких (до +1600 °С) температурах, где  $\sigma_{0,2/\tau}^t$  — предел ползучести — наибольшее постоянное напряжение, которое за определенное время  $\tau$  (обычно 100 или 1000) при постоянной температуре  $t$  вызывает остаточную деформацию, не превышающую заданного значения (как правило, 0,2%);  $\sigma_{\tau}^t$  — предел длительной прочности — наибольшее постоянное напряжение, вызывающее разрушение за определенное время  $\tau$  при постоянной заданной температуре  $t$ .

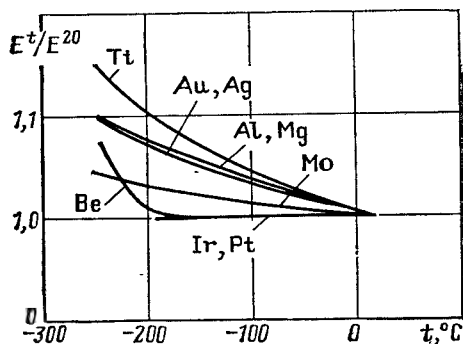


Рис. 3.2. Зависимость модуля упругости некоторых материалов от температуры [3, 6] (значения модуля упругости при 20 °С см. в табл. 3.1)

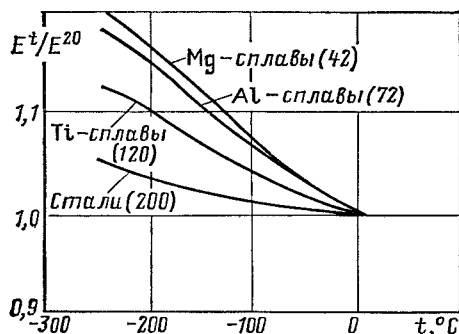


Рис. 3.3. Зависимость модуля упругости сталей и сплавов от температуры [3, 5, 10]. (В скобках — значения модуля упругости при 20 °С —  $E_{ст}^{20}$ , ГПа)

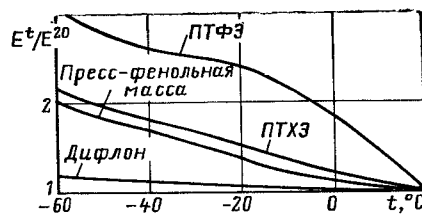


Рис. 3.4. Зависимость модуля упругости металлов от температуры [24], для дифлона  $E^{20}=2,45$  ГПа, для ПТХЭ (фторопласта-3)  $E^{20}=1,45$  ГПа, для ПТФЭ (фторопласта-4)  $E^{20}=850$  МПа, для пресс-фенольной массы  $E^{20}=7,9$  МПа)

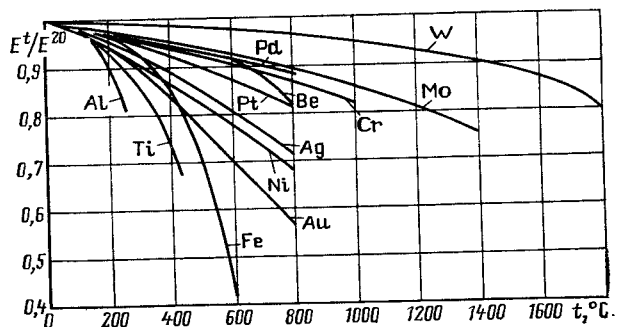


Рис. 3.5. Зависимость модуля упругости металлов от температуры [3, 6]. Значения модуля упругости при 20 °С см. в табл. 3.1)

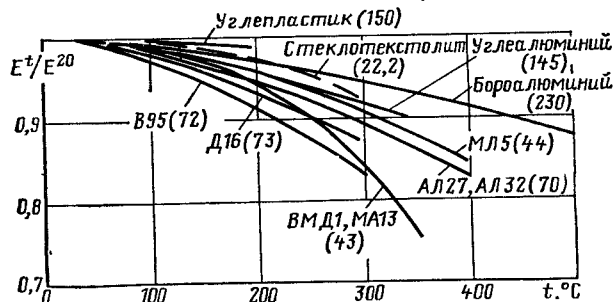


Рис. 3.6. Зависимость модуля упругости материалов от температуры с повышением ее до 500 °С [3, 14, 24]. (В скобках — значения модуля упругости при 20 °С —  $E_{дин}^{20}$ , ГПа)

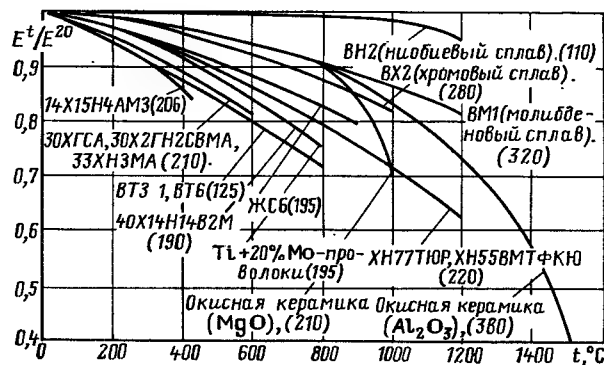


Рис. 3.7. Зависимость модуля упругости материалов от температуры с повышением ее до 1200 °С [3, 24]. (В скобках — значения модуля упругости при 20 °С —  $E_{дин}^{20}$ , ГПа)

Таблица 3.33. Механические свойства металлов при низких температурах [3, 6, 11]

| Металл            | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |      |       | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |      |       | $\delta$ , %, при $t$ , °C |      |      | $\psi$ , %, при $t$ , °C |      |      |
|-------------------|--------------------------------|------|-------|------------------------------------|------|-------|----------------------------|------|------|--------------------------|------|------|
|                   | 20                             | —196 | —253  | 20                                 | —196 | —253  | 20                         | —196 | —253 | 20                       | —196 | —253 |
| Алюминий          | 120                            | 210  | 350   | —                                  | —    | —     | 30                         | 42   | 45   | 85                       | 75   | 65   |
| Бериллий          | 300                            | 270  | —     | 200                                | 230  | —     | —                          | —    | —    | —                        | —    | —    |
| Ванадий           | 420                            | 1080 | —     | —                                  | —    | —     | 14                         | 3,5  | —    | —                        | —    | —    |
| Железо            | 360                            | 830  | 1060* | 260                                | 780  | 1060* | 27                         | 4    | 0,6* | 88                       | 54   | 73*  |
| Магний            | 120                            | 160  | 210   | —                                  | —    | —     | 5                          | 5    | 5    | 10                       | 7    | 8    |
| Медь              | 240                            | 380  | 460   | —                                  | —    | —     | 29                         | 41   | 46   | 70                       | 72   | 74   |
| Молибден          | 490                            | 540  | 540   | —                                  | —    | —     | 3                          | 0    | 0    | 3                        | 3    | 4    |
| Натрий            | 14                             | 19   | 40    | —                                  | —    | —     | 19                         | 13   | 60   | —                        | —    | —    |
| Никель            | 390                            | 600  | 750*  | 125                                | 145  | 145*  | 54                         | 61   | 62*  | 85                       | 80   | 75*  |
| Ниобий            | 350                            | 1030 | 1120  | —                                  | —    | —     | 30                         | —    | 7    | —                        | —    | —    |
| Олово             | 36                             | 71   | 73    | —                                  | —    | —     | —                          | —    | —    | —                        | —    | —    |
| Свинец            | 28                             | 45   | 70    | —                                  | —    | —     | 26                         | 34   | 36   | —                        | —    | —    |
| Серебро           | 180                            | 290  | 360   | —                                  | —    | —     | 39                         | 82   | 88   | 90                       | 88   | 80   |
| Тантал            | 620                            | 1030 | 1150* | 560                                | 1030 | 1150* | 13                         | 6    | 0,6* | 69                       | 74   | 77*  |
| Титан             | 750                            | 1190 | 1340* | 660                                | 1080 | 1340* | 18                         | 12   | 1*   | 48                       | 16   | 4*   |
| Титан иодидный    | 250                            | 630  | —     | 154                                | 440  | —     | 50                         | 11,5 | —    | 78                       | 28   | —    |
| Цирконий иодидный | 260                            | 470  | 680*  | 140                                | 230  | 160*  | 35                         | 49   | 47*  | 52                       | 58   | 52*  |

\* При температуре —269 °C.

Таблица 3.34. Прочность сталей и сплавов при низких температурах [3, 5, 19]

| Сталь, сплав, термическая обработка | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |      |      | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |      |      |
|-------------------------------------|--------------------------------|-----|------|------|------------------------------------|-----|------|------|
|                                     | 20                             | —70 | —196 | —253 | 20                                 | —70 | —196 | —253 |

## Стали

|                                               |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ст. 45, нормализация                          | 600  | —    | 1050 | 1400 | 400  | —    | 950  | 1400 |
| Ст. 45, закалка и отпуск                      | 1000 | 1050 | 1320 | —    | 890  | 960  | 1280 | —    |
| 30ХГСА, закалка и отпуск                      | 1200 | 1300 | 1580 | —    | 1100 | 1180 | 1500 | —    |
| 40ХНМА, закалка и отпуск                      | 1100 | 1300 | 1550 | —    | 980  | 1080 | 1400 | —    |
| 30ХГСНА, изотермическая закалка               | 1600 | 1700 | 1900 | —    | 1200 | 1230 | 1450 | —    |
| 40ХГСНЗБА, закалка и отпуск                   | 2100 | 2200 | 2400 | —    | 1450 | 1480 | 1700 | —    |
| 12Х18Н9Т, закалка                             | 620  | 1150 | 1650 | 1900 | 250  | 300  | 370  | 420  |
| 08Х15Н5Д2Т, закалка и отпуск                  | 1150 | 1230 | 1500 | 1750 | 1000 | 1080 | 1350 | 1650 |
| 10Х12Н20ТЗР, закалка и старение               | 1080 | —    | 1100 | 1450 | 620  | —    | 1100 | 880  |
| 12Х14Г14Н3Т, закалка                          | 750  | —    | 1400 | 1500 | 500  | —    | 500  | 600  |
| 08Х16Н6, закалка, обработка холодом, старение | 1350 | 1500 | 1750 | 1850 | 1250 | 1350 | 1650 | 1800 |
| 45Л, отпуск                                   | 770  | 850  | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 27ХГСНЛ, изотермическая закалка               | 1450 | 1500 | —    | —    | 1250 | 1350 | —    | —    |
| 35ХГСЛ, закалка и отпуск                      | 950  | 1030 | 1350 | —    | —    | —    | —    | —    |

## Титановые сплавы

|              |      |      |      |      |     |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| BT5-1, отжиг | 750  | 950  | 1350 | 1600 | 650 | 850  | 125  | 1550 |
| OT4, отжиг   | 810  | 870  | 1220 | 1500 | 660 | 830  | 115  | 1300 |
| BT6, отжиг   | 100  | 120  | 1650 | 1850 | 950 | 1150 | 155  | 1750 |
| BT5Л         | 850  | 1000 | 1350 | 1500 | 820 | 950  | 1300 | 1300 |
| BT20Л        | 1000 | 1100 | —    | —    | —   | —    | —    | —    |
| BT21Л        | 1100 | 1200 | —    | —    | —   | —    | —    | —    |

## Алюминиевые сплавы

|        |     |     |     |      |     |     |     |      |
|--------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| АД1М   | 80  | 95  | 170 | 260  | 30  | 30  | 40  | 54   |
| АМГ6М  | 320 | 350 | 470 | 545  | 170 | 175 | 185 | 195  |
| АД33Т1 | 310 | 350 | 410 | 530* | 270 | 310 | 350 | 390* |

| Сталь, сплав, термическая обработка | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |      |      | $\sigma_{0.2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |      |      |
|-------------------------------------|--------------------------------|-----|------|------|------------------------------------|-----|------|------|
|                                     | 20                             | -70 | -196 | -253 | 20                                 | -70 | -196 | -253 |
| Д16Т                                | 440                            | 470 | 550  | 700  | 290                                | 330 | 420  | 520  |
| Д16Т1                               | 495                            | 535 | 685  | 720* | 455                                | 490 | 575  | 625* |
| 1201Т1                              | 430                            | 460 | 530  | 680  | 320                                | 380 | 410  | 490  |
| В92Т1                               | 440                            | 470 | 510  | 610  | 320                                | 330 | 360  | 400  |
| В93Т1                               | 490                            | 520 | 580  | —    | 450                                | 470 | 530  | —    |
| В95Т1                               | 600                            | 620 | 750  | 810  | 550                                | 560 | 640  | 730  |
| САП-1                               | 320                            | 380 | 480  | 560  | 220                                | 260 | 350  | 450  |
| АБм1                                | 400                            | 420 | 530  | —    | 280                                | 280 | 400  | —    |
| АЛ4Т6                               | 350                            | 420 | 370  | 470  | 320                                | 320 | 360  | 450  |
| АЛ19Т4                              | 320                            | 320 | 370  | 390  | 210                                | 210 | 250  | 330  |
| АЛ9Т5                               | 210                            | 245 | 270  | —    | 90                                 | —   | —    | —    |
| ВАЛ8Т5                              | 400                            | 430 | 480  | —    | 340                                | —   | —    | —    |
| АЛ27Т1                              | 350                            | 430 | 300  | 270  | 250                                | 230 | 280  | 260  |

## Магние́вые сплавы

|        |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| МА2М   | 250 | 300 | 370 | 430 | 140 | 180 | 210 | 230 |
| МА2-1М | 270 | 290 | 380 | —   | 180 | —   | 315 | —   |
| МА14Т1 | 320 | 410 | 470 | 480 | 260 | 360 | 380 | 400 |
| МЛ4    | 200 | 200 | 220 | —   | —   | —   | —   | —   |
| МЛ5Т6  | 240 | 240 | 240 | —   | —   | —   | —   | —   |
| МЛ10Т6 | 240 | 300 | 320 | —   | —   | —   | —   | —   |
| МЛ15Т1 | 210 | 210 | 220 | —   | —   | —   | —   | —   |

## Медные сплавы

|                      |     |   |     |     |   |   |   |   |
|----------------------|-----|---|-----|-----|---|---|---|---|
| ЛС59, мягкая         | 450 | — | 590 | 680 | — | — | — | — |
| БрОФ6,5—0,4, твердая | 630 | — | 840 | 950 | — | — | — | — |

## Никелевые сплавы

|                             |      |   |      |      |      |   |      |      |
|-----------------------------|------|---|------|------|------|---|------|------|
| ХН77ТЮР, закалка и старение | 1300 | — | 1360 | —    | 690  | — | 800  | —    |
| ХН77ТЮ, закалка и старение  | 1200 | — | 1600 | 1050 | 600  | — | 650  | 500  |
| ЖСКП                        | 1400 | — | 1650 | 1630 | 1000 | — | 1200 | 1280 |

\* При температуре —269 °C.

Таблица 3.35. Пластичность и вязкость сталей и сплавов при низких температурах [3,5,19]

| Сталь, сплав, термическая обработка           | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |      |      | $\psi$ , %, при $t$ , °C |     |      |      | КСУ, МДж/м², при $t$ , °C |      |      |
|-----------------------------------------------|----------------------------|-----|------|------|--------------------------|-----|------|------|---------------------------|------|------|
|                                               | 20                         | -70 | -196 | -253 | 20                       | -70 | -196 | -253 | 20                        | -70  | -196 |
| <i>Стали</i>                                  |                            |     |      |      |                          |     |      |      |                           |      |      |
| 45, нормализация                              | —                          | —   | —    | —    | 55                       | —   | 38   | 0    | —                         | —    | —    |
| 45, закалка и отпуск                          | 13                         | —   | 13   | —    | 52                       | 52  | 48   | —    | 1                         | 0,6  | 0,1  |
| 30ХГСА, закалка и отпуск                      | 14                         | 14  | 7    | —    | 50                       | 47  | 13   | —    | 0,7                       | 0,4  | 0,15 |
| 40ХНМА, закалка и отпуск                      | 17                         | 13  | 12   | —    | 55                       | 50  | 27   | —    | 1,1                       | 6    | 0,4  |
| 30ХГСНА, изотермическая закалка               | 13                         | 14  | 2,5  | —    | 52                       | 53  | —    | —    | 0,9                       | 0,45 | 0,1  |
| 40ХГСНЗВА, закалка и отпуск                   | 11                         | 13  | 10   | —    | 43                       | 45  | 14   | —    | 0,55                      | 0,55 | 0,15 |
| 12Х18Н9Г, закалка                             | 40                         | 37  | 30   | 25   | —                        | —   | —    | —    | 1,3                       | 1,6  | 2,0  |
| 08Х15НД2Т, закалка и отпуск                   | 10                         | 11  | 13   | 8    | 50                       | 48  | 47   | 35   | —                         | —    | —    |
| 10Х12Н20Т3Р, закалка и старение               | 30                         | —   | 30   | 10   | —                        | —   | —    | —    | —                         | —    | 2,2  |
| 12Х14Г14НЗТ, закалка                          | 45                         | —   | 40   | 35   | —                        | —   | —    | —    | —                         | —    | —    |
| 08Х16Н6, закалка, обработка холодом, старение | —                          | —   | —    | —    | 58                       | 53  | 45   | 40   | 1,5                       | 2,3  | 2,2  |
| 45Л, отпуск                                   | 18                         | 17  | —    | —    | 35                       | 20  | —    | —    | 0,75                      | 0,35 | —    |
| 27ХГСНЛ, изотермическая закалка               | 8                          | 10  | —    | —    | 45                       | 40  | —    | —    | 0,6                       | 0,35 | —    |
| 35ХГСЛ, закалка и отпуск                      | 15                         | 15  | 6    | —    | 50                       | 50  | 10   | —    | —                         | —    | —    |

| Сталь, сплав, термическая обработка | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |      |      | $\psi$ , %, при $t$ , °C |     |      |      | КСУ, МДж/м², при $t$ , °C |     |      |
|-------------------------------------|----------------------------|-----|------|------|--------------------------|-----|------|------|---------------------------|-----|------|
|                                     | 20                         | -70 | -196 | -253 | 20                       | -70 | -196 | -253 | 20                        | -70 | -196 |

## Титановые сплавы

|              |    |    |    |   |    |    |    |    |     |     |     |
|--------------|----|----|----|---|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| BT5-1, отжиг | 10 | 8  | 6  | 3 | —  | —  | —  | —  | —   | —   | —   |
| OT4, отжиг   | 24 | 15 | 12 | — | —  | —  | —  | —  | 0,5 | 0,3 | 0,2 |
| BT6, отжиг   | 16 | 15 | 12 | 3 | 33 | 33 | 30 | 4  | 0,4 | —   | 0,3 |
| BT5Л         | 9  | 11 | 8  | 3 | 25 | 25 | 14 | 14 | —   | —   | —   |
| BT20Л        | 10 | 5  | —  | — | —  | —  | —  | —  | —   | —   | —   |
| BT21Л        | 10 | 2  | —  | — | —  | —  | —  | —  | —   | —   | —   |

## Алюминиевые сплавы

|        |     |     |     |      |    |     |     |     |      |      |      |
|--------|-----|-----|-----|------|----|-----|-----|-----|------|------|------|
| AD1M   | 35  | 45  | 50  | 45   | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| AMГ6M  | 17  | 23  | 31  | 34   | 29 | 50  | 33  | 27  | —    | —    | —    |
| AD33T1 | 15  | —   | 20  | 23*  | 42 | —   | 39  | 34* | —    | —    | —    |
| DI6T1  | 14  | 13  | 10  | 16   | 16 | 16  | 15  | —   | 0,24 | 0,24 | 0,24 |
| DI6T1  | 8   | 6   | 7,5 | 9,5* | 17 | 14  | 13  | 14* | —    | —    | —    |
| I20IT1 | 10  | 11  | 13  | 10   | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| B92T1  | 14  | 19  | 17  | 11   | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| B93T1  | 7   | 8   | 6   | —    | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| B95T1  | 10  | 9   | 7   | 5    | 13 | 15  | 9   | —   | 0,15 | 0,1  | 0,1  |
| САП1   | 5   | 7   | 8   | 10   | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| АВМ1   | 15  | 16  | 35  | —    | 20 | 16  | —   | —   | —    | —    | —    |
| AL4T6  | 3,5 | 2,5 | 2,5 | 1    | 5  | 6,5 | 3,5 | 3   | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| AL19T4 | 9,5 | 9,5 | 6   | 5    | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| AL9T5  | 2   | 2,5 | 2,8 | —    | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| BAЛ8T5 | 4   | 4   | 3,5 | —    | —  | —   | —   | —   | —    | —    | —    |
| AL27T1 | 15  | 25  | 2   | 0,1  | 20 | 28  | 3   | 0,5 | —    | —    | —    |

## Магниевые сплавы

|        |     |    |     |   |    |   |   |   |       |       |      |
|--------|-----|----|-----|---|----|---|---|---|-------|-------|------|
| MA2M   | 25  | 23 | 10  | 8 | —  | — | — | — | —     | —     | —    |
| MA2-1M | 15  | 9  | 2,5 | — | —  | — | — | — | —     | —     | —    |
| MA14T1 | 13  | 8  | 2,5 | — | —  | — | — | — | —     | —     | —    |
| ML4    | 8   | 6  | 5   | — | 12 | 9 | 4 | — | —     | —     | —    |
| ML5T6  | 5,5 | 4  | 2   | — | 7  | 5 | 4 | — | 0,035 | 0,025 | 0,02 |
| ML10T6 | 5   | 5  | 4   | — | —  | — | — | — | —     | —     | —    |
| ML15T1 | 3,5 | 1  | 1   | — | —  | — | — | — | —     | —     | —    |

## Медные сплавы

|                    |    |   |    |    |    |   |    |    |   |   |   |
|--------------------|----|---|----|----|----|---|----|----|---|---|---|
| ЛС59, мягкая       | 32 | — | 37 | 34 | 35 | — | 38 | 35 | — | — | — |
| BrOF6,5—4, твердая | 12 | — | 29 | 29 | 61 | — | 54 | 51 | — | — | — |

## Никелевые сплавы

|                             |    |   |    |    |    |   |    |   |     |   |      |
|-----------------------------|----|---|----|----|----|---|----|---|-----|---|------|
| ХН77ТЮР, закалка и старение | 25 | — | 18 | —  | 20 | — | 15 | — | 0,5 | — | 0,35 |
| ХН77ТЮ, закалка и старение  | 28 | — | 30 | 18 | 35 | — | 28 | 8 | —   | — | —    |
| ЖС6КП, закалка              | 20 | — | 15 | 13 | —  | — | —  | — | —   | — | —    |

\* При температуре —269 °C.

Таблица 3.36. Механические свойства сталей при высоких температурах [3,24]

| Стали | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|       | 20                             | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 20                                 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 20                         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| 10    | 430                            | 495 | 525 | 380 | 260 | 110 | 265                                | 225 | 180 | 170 | 160 | 95  | —                          | —   | —   | —   | —   | —   |
| 20    | 480                            | 440 | 450 | 360 | 220 | 130 | 270                                | 230 | 180 | 150 | 130 | 90  | —                          | —   | —   | —   | —   | —   |
| 45    | 640                            | 700 | 730 | 575 | 385 | 220 | 365                                | 355 | 265 | 230 | 180 | 80  | —                          | —   | —   | —   | —   | —   |

| Стали          | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |      |      |      |      |      | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |      |     |      |      |      | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |
|----------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------------------------------------|------|-----|------|------|------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | 20                             | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 20                                 | 200  | 300 | 400  | 500  | 600  | 20                         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| 38ХА, 40Х      | 950                            | 900  | 890  | 700  | 500  | —    | —                                  | —    | —   | —    | —    | —    | —                          | —   | —   | —   | —   | —   |
| 40ХФА          | 950                            | 925  | 860  | —    | 505  | 385  | 860                                | 825  | 760 | 720  | 420  | —    | 26                         | 22  | 19  | 29  | 30  | 50  |
| 30ХМА          | 950                            | 800  | —    | 740  | 570  | —    | 750                                | 650  | —   | 600  | 500  | —    | 12                         | 20  | —   | 19  | 19  | —   |
| 30ХГСА, 40ХНМА | 1100                           | —    | 1000 | 920  | 700  | 550* | 950                                | —    | 840 | 800  | 650  | 500* | 13                         | —   | 11  | 16  | 21  | 27* |
| 12Х2НВФА       | 1150                           | —    | 1020 | 1050 | 1020 | —    | 950                                | —    | 900 | 920  | 920  | —    | 17                         | —   | 14  | 15  | 12  | —   |
| 30Х2Н2ВФА      | 1180                           | —    | —    | 1050 | 920  | —    | 1090                               | —    | —   | 930  | 860  | —    | 15                         | —   | —   | 12  | 12  | —   |
| 08ХГСН2А       | 1600                           | 1600 | —    | 1500 | 1150 | —    | 1350                               | 1350 | —   | 1250 | 1050 | —    | 9                          | 9   | —   | 11  | 9   | —   |
| 12Х18Н10Т      | 650                            | —    | 450  | 450  | 450  | 400  | 300                                | —    | 200 | 180  | 180  | 180  | 40                         | —   | 30  | 30  | 30  | 25  |
| 14Х17Н2        | 1200                           | —    | 1120 | —    | 950  | 380  | 900                                | —    | 840 | —    | —    | —    | 8                          | —   | 8   | —   | 16  | 30  |
| 09Х15Н9Ю       | 1200                           | 1130 | 1050 | 1000 | 750  | —    | 950                                | 900  | 850 | 800  | 500  | —    | 10                         | 8   | 8   | 8   | 10  | —   |
| 08Х17Н5М3      | 1200                           | —    | —    | 1100 | 950  | 750* | 1000                               | —    | —   | 850  | 600  | 500* | 10                         | —   | —   | —   | —   | 10* |
| 20Л            | 440                            | 430  | 450  | 370  | 230  | —    | 260                                | 240  | 200 | 170  | 130  | —    | 30                         | 22  | 21  | 32  | 45  | —   |
| 20ХМФЛ         | 600                            | 580  | 550  | 520  | 480  | 350  | 400                                | 400  | 390 | 370  | 340  | 280  | 18                         | 14  | 13  | 14  | 15  | 20  |
| 30ХНВЛ         | 850                            | 790  | 820  | 720  | 580  | 330  | 700                                | 630  | 600 | 560  | 500  | 300  | 18                         | 16  | 16  | 14  | 15  | 19  |
| 12Х13Н3ВФЛ     | 900                            | —    | —    | 780  | 620  | 400  | 750                                | —    | —   | 610  | 480  | 270  | 10                         | —   | —   | 6   | 9   | 17  |
| 23Х6Н2МВФА     | 920                            | —    | 730  | 650  | 550  | 370  | 700                                | —    | 610 | 570  | 520  | 340  | 12                         | —   | 14  | 15  | 16  | 24  |
| 08Х17Н3СЛ      | 1200                           | —    | —    | 1130 | 1040 | —    | 1100                               | —    | —   | 970  | 910  | —    | 8                          | —   | —   | 6,5 | 7   | —   |

\* Испытано при температуре 550 °C.

Таблица 3.37. Механические свойства титановых сплавов при высоких температурах [3,10]

| Сплав | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |      | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |
|-------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|       | 20                             | 200 | 300 | 400 | 500 | 600  | 20                                 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 20                         | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| BT1-1 | 450                            | —   | 220 | 150 | —   | —    | 380                                | —   | 180 | 150 | —   | —   | 25                         | —   | 30  | 35  | —   | —   |
| OT4-1 | 650                            | —   | 380 | 310 | —   | —    | 470                                | —   | 290 | 260 | —   | —   | 20                         | —   | 23  | 17  | —   | —   |
| OT4   | 750                            | —   | 490 | 460 | —   | —    | 600                                | —   | 430 | 390 | —   | —   | —                          | —   | —   | —   | —   | —   |
| BT5   | 800                            | —   | 480 | —   | —   | —    | 700                                | —   | 380 | 350 | —   | —   | 15                         | —   | —   | —   | —   | —   |
| BT5-1 | 750                            | 680 | 550 | 510 | 490 | 380  | 650                                | —   | 460 | —   | —   | —   | 15                         | 10  | 17  | 15  | 20  | 26  |
| AT4   | 900                            | —   | 680 | 600 | —   | —    | 850                                | —   | 600 | 550 | —   | —   | 15                         | —   | 17  | 20  | —   | —   |
| BT6   | 1000                           | —   | —   | 580 | 530 | —    | 900                                | —   | —   | 500 | 420 | —   | 8                          | —   | —   | 9   | 16  | —   |
| BT6C  | 920                            | 670 | —   | —   | 510 | —    | 870                                | 580 | —   | —   | 400 | —   | 10                         | 11  | —   | —   | 15  | —   |
| BT8   | 1070                           | 860 | 830 | 770 | 730 | 600  | 920                                | 710 | 690 | 630 | 570 | 400 | 10                         | 10  | 9   | 8   | 8   | 9   |
| BT9   | 1150                           | 950 | 920 | 850 | 800 | 720  | 1030                               | —   | 740 | 720 | 660 | 550 | 6                          | —   | 10  | 7   | 7   | 9   |
| BT3-1 | 1000                           | 910 | 840 | 760 | 700 | 530  | 950                                | 740 | 660 | 630 | 560 | 250 | 12                         | 11  | 9   | 8   | 10  | 18  |
| BT20  | 1000                           | 780 | 730 | 700 | 650 | 470  | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | —                          | —   | —   | —   | —   | —   |
| BT5Л  | 900                            | —   | 400 | 350 | 300 | —    | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 8                          | —   | 8   | 10  | 13  | —   |
| BT6Л  | 900                            | —   | 550 | 500 | —   | —    | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 9                          | —   | 9   | 9   | —   | —   |
| BT9Л  | 950                            | —   | 710 | 560 | 640 | 250* | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 9                          | —   | 9   | 7   | 8   | 5*  |
| BT20Л | 1000                           | —   | 670 | 610 | 560 | —    | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 10                         | —   | 10  | 10  | 12  | —   |
| BT21Л | 1100                           | —   | 700 | 670 | 630 | —    | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 10                         | —   | 10  | 11  | 12  | —   |

\* При температуре 800 °C.

Таблица 3.38. Механические свойства алюминиевых сплавов при высоких температурах [3,5]

| Сплав, состояние | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |
|------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                  | 20                             | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 20                                 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 20                         | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| AD1M             | 80                             | —   | 60  | 42  | 28  | 18  | 30                                 | —   | 29  | 25  | 17  | 10  | 35                         | —   | 55  | 65  | 75  | 80  |
| AD1H             | 150                            | 135 | 110 | 42  | 28  | 18  | 100                                | 70  | 45  | 28  | 14  | 10  | 6                          | 7   | 11  | 55  | 65  | 80  |
| AMg2M            | 190                            | 170 | 160 | 130 | 110 | 70  | 80                                 | 80  | 70  | 60  | —   | —   | 23                         | 26  | 35  | 50  | 60  | 75  |
| AMg2П            | 260                            | 260 | 220 | 160 | 80  | 50  | 210                                | 210 | 190 | 100 | 50  | 35  | 14                         | 16  | 25  | 40  | 80  | 100 |
| AMg2H            | 290                            | —   | 250 | 160 | 90  | 50  | 260                                | —   | 210 | 100 | 70  | 30  | 8                          | —   | 25  | 40  | 60  | 100 |
| AMg6M            | 320                            | 300 | 250 | 190 | 160 | 130 | 170                                | 150 | 130 | 120 | 100 | 80  | 24                         | 30  | 37  | 43  | 45  | 48  |
| AD33T1           | 310                            | —   | 240 | 200 | —   | 90  | 270                                | —   | 200 | 180 | —   | 80  | 2                          | —   | 11  | 11  | —   | 8   |
| AK8T1            | 490                            | —   | 410 | 340 | 230 | —   | 450                                | —   | 370 | 310 | 220 | —   | 1                          | —   | 14  | 13  | 14  | —   |
| D1T              | 410                            | —   | 280 | 150 | 90  | 50  | 250                                | —   | 210 | 110 | 65  | 35  | 15                         | —   | 16  | 28  | 45  | 95  |

| Сплав,<br>состояние | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |
|---------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     | 20                             | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 20                                 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 20                         | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Д16Т*               | 440                            | —   | 380 | 330 | 220 | 150 | 290                                | —   | 265 | 255 | 195 | 115 | 19                         | —   | 19  | 11  | 13  | 13  |
|                     | 520                            | —   | 440 | 420 | 290 | 190 | 380                                | —   | —   | —   | —   | —   | 16                         | —   | 14  | 9   | 10  | 12  |
| ВАД1Т               | 430                            | —   | —   | 340 | 270 | 170 | 280                                | —   | —   | 230 | 210 | 140 | 18                         | —   | —   | 20  | 16  | 18  |
| АК4-1Т1             | 420                            | —   | 360 | 320 | 250 | —   | 360                                | —   | 330 | 290 | 230 | —   | 7                          | —   | 7   | 10  | 11  | —   |
| Д20Т1               | 420                            | —   | 350 | 300 | 230 | —   | 320                                | —   | 280 | 250 | 190 | —   | 10                         | —   | 13  | 14  | 15  | —   |
| 1915Т1              | 380                            | 325 | 290 | 250 | —   | —   | 310                                | 280 | 250 | —   | —   | —   | 10                         | 14  | 18  | —   | —   | —   |
| В92Т1               | 480                            | 410 | 330 | 280 | —   | —   | 370                                | 300 | 270 | 240 | —   | —   | 7                          | 10  | 16  | 14  | —   | —   |
| В93Т1               | 490                            | 430 | 380 | —   | —   | —   | 450                                | 400 | 340 | —   | —   | —   | 7                          | 6   | 4   | —   | —   | —   |
| В95Т1*              | 520                            | 480 | 410 | 280 | 150 | —   | 440                                | 410 | 350 | 240 | 120 | —   | 14                         | 14  | 15  | 11  | 16  | —   |
|                     | 600                            | 530 | 430 | 330 | 160 | —   | 550                                | 500 | 400 | 310 | 150 | —   | 8                          | 8   | 7   | —   | 16  | —   |
| АЛ1Т5               | —                              | —   | —   | 180 | 175 | 130 | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | —                          | —   | —   | 1,5 | 1,9 | 4   |
| АЛ3Т5               | 220                            | —   | —   | 180 | 150 | 100 | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 0,8                        | 1   | 1   | 1,4 | 1,5 | 4   |
| АЛ32Т5, Т6          | 245                            | —   | 225 | 210 | 150 | —   | 180                                | —   | 175 | 170 | 125 | —   | 2                          | —   | 2,5 | 4   | 4   | —   |
| АЛ4МТ5              | 340                            | 300 | 280 | 260 | 180 | 145 | 250                                | —   | —   | —   | —   | —   | 3                          | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 6   |
| АЛ4Т6               | 240                            | 220 | 190 | 160 | 110 | —   | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 3                          | 3   | 3,5 | 4   | 5,4 | 5   |
| В124Т6              | 360                            | —   | —   | 300 | 220 | 130 | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 0,5                        | —   | —   | 1   | 1,5 | 2,5 |
| В124Т6К**           | 415                            | —   | —   | 310 | 210 | 140 | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 2,5                        | —   | —   | 3,5 | 4   | 6   |
| АЛ19Т5              | 370                            | —   | —   | 280 | 200 | 150 | 280                                | —   | —   | 220 | 160 | 100 | 5                          | —   | —   | 3   | 4   | 5   |
| АЛ33Т5***           | 280                            | —   | —   | —   | 210 | 160 | 180                                | —   | —   | 150 | 100 | —   | 2                          | —   | —   | —   | 2   | 2,5 |
| АЛ9-1Т5             | 270                            | —   | 210 | 210 | 140 | —   | 150                                | —   | 150 | 170 | 130 | —   | 5                          | —   | 15  | 6   | 4   | —   |
| АЛ9-1Т6К**          | 320                            | —   | 240 | 200 | 130 | —   | 240                                | —   | 200 | 180 | 120 | —   | 7                          | —   | 12  | 6   | 6   | —   |
| ВАЛ8Т5К**           | 400                            | —   | 340 | 300 | 220 | 130 | —                                  | —   | —   | —   | —   | —   | 4                          | —   | 8   | 9   | 10  | 11  |

\* В числителе для катаных полуфабрикатов, в знаменателе — для прессованных.

\*\* Литые в кокиль, остальные — в землю.

\*\*\* При температуре 350 °C:  $\sigma_B=100$  МПа;  $\sigma_{0,2}=70$  МПа;  $\delta=5$  %.

Таблица 3.39. Прочность порошковых алюминиевых сплавов и композиционных материалов на алюминиевой и магниевой матрице при высоких температурах [5,14,24]

| Материалы                                            | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                      | 20                             | 100  | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  | 500  |
| САП-1                                                | 300                            | 260  | —    | 180  | —    | 120  | —    | 60   |
| САП-2                                                | 350                            | —    | —    | 210  | —    | 130  | —    | 85   |
| САП-3                                                | 400                            | —    | —    | 240  | —    | 180  | —    | 90   |
| Алюминиевый сплав + 50% борного волокна              | 1200                           | 1100 | 1050 | 1000 | 950  | —    | 900  | 800  |
| Алюминий + 40% углеродного волокна                   | 1200                           | 1180 | 1150 | 1100 | 1080 | 1050 | 1000 | —    |
| Алюминий + 40% бериллиевой проволоки                 | 560                            | 510  | 420  | 390  | 340  | —    | —    | —    |
| Алюминий + 50% кварцевого волокна ( $\text{SiO}_2$ ) | 840                            | 820  | 780  | —    | 730  | —    | 470  | 390* |
| Магний + 25% борного волокна                         | 920                            | —    | 900  | —    | 770  | —    | 730  | 650  |
| Магний + 50% борного волокна                         | 1200                           | —    | —    | —    | —    | —    | —    | 800* |

\* При температуре 450 °C.

Таблица 3.40. Механические свойства магниевых сплавов при высоких температурах [3,24]

| Сплав,<br>состояние | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |     | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |     | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     | 20                             | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 20                                 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 20                         | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| МА2                 | 270                            | 210 | 165 | 115 | 75  | —   | —   | 170                                | 115 | —   | —   | —   | —   | —   | 10                         | 30  | 45  | 60  | 75  | —   | —   |
| МА2-1               | 300                            | 225 | 190 | 130 | 90  | 70  | —   | 200                                | 115 | 95  | 75  | 45  | 40  | —   | 14                         | 19  | 30  | 35  | 45  | 50  | —   |
| МА5                 | 310                            | 220 | 170 | 125 | 85  | 70  | —   | 220                                | 130 | 100 | 70  | 55  | 35  | —   | 11                         | 22  | 30  | 38  | 45  | 85  | —   |
| МА8                 | 240                            | 180 | 150 | 130 | 110 | 70  | —   | 150                                | 100 | 70  | 60  | 50  | —   | —   | 15                         | 26  | 30  | 32  | 34  | 62  | —   |
| МА11                | 280                            | —   | —   | 210 | 180 | 140 | 100 | 145                                | —   | —   | 110 | 90  | 80  | 60  | 10                         | —   | —   | 13  | 15  | 19  | 45  |
| МА14                | 330                            | 260 | 210 | 150 | 105 | 70  | —   | 255                                | —   | —   | —   | —   | —   | —   | 10                         | 20  | 28  | 50  | 58  | 62  | —   |

| Сплав,<br>состояние | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |     | $\sigma_{0,2}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |     | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     | 20                             | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 20                                 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 20                         | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| ВМД1*               | 300                            | —   | —   | 170 | 150 | 130 | 110 | 250                                | —   | —   | —   | 130 | 105 | 90  | 5                          | —   | —   | 12  | 12  | 13  | 20  |
| МЛ3                 | 180                            | 160 | 145 | 105 | —   | 60  | —   | 55                                 | 50  | 45  | 40  | —   | 30  | —   | 8                          | 10  | 11  | 12  | —   | 11  | —   |
| МЛ4Т4               | 250                            | 240 | 210 | 150 | 75  | —   | —   | 85                                 | 80  | 75  | 68  | —   | —   | —   | 9                          | 7   | 15  | 25  | 26  | —   | —   |
| МЛ5Т4               | 250                            | 230 | 185 | 155 | 120 | 90  | —   | 90                                 | 80  | 60  | 50  | 40  | —   | —   | 9                          | 10  | 12  | 15  | 15  | —   | —   |
| МЛ6Т6               | 260                            | 230 | 210 | 150 | 110 | 80  | —   | 140                                | —   | 85  | —   | 70  | —   | —   | 1,5                        | 5   | 8   | 15  | —   | —   | —   |
| МЛ9Т6               | 250                            | —   | —   | 210 | 170 | 120 | —   | 145                                | —   | —   | 135 | 120 | 105 | 60  | 6                          | —   | —   | 5   | 10  | 20  | 25  |
| МЛ10Т6              | 240                            | —   | —   | 190 | 165 | 135 | —   | 150                                | —   | —   | 140 | 130 | 110 | 2   | 5                          | —   | —   | 8   | 13  | 17  | —   |
| МЛ11Т6              | 160                            | —   | —   | 140 | 130 | 105 | 75  | 100                                | —   | —   | 80  | 75  | 60  | 45  | 3                          | —   | —   | 6   | 8,5 | 30  | 30  |
| МЛ12Т6              | 250                            | —   | 160 | 125 | 85  | 55  | —   | 150                                | —   | 100 | 75  | 50  | 30  | —   | 6                          | —   | 8   | 10  | 12  | 15  | —   |
| МЛ15Т1              | 220                            | —   | 150 | 125 | 100 | 75  | —   | 140                                | —   | 105 | 85  | 65  | 50  | —   | 3,5                        | —   | 5   | 13  | 16  | 16  | —   |
| ВМЛ1Т6**            | 200                            | —   | —   | —   | —   | 145 | 110 | 95                                 | —   | —   | —   | —   | 75  | 55  | 6                          | —   | —   | —   | —   | 10  | 20  |

\* При температуре 400 °C:  $\sigma_B = 70$  МПа;  $\delta = 24\%$ .\*\* При температуре 400 °C:  $\sigma_B = 65$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 35$  МПа;  $\delta = 25\%$ .

Таблица 3.41. Прочность и пластичность жаропрочных сталей и сплавов при высоких температурах [3,24]

| Сталь, сплав               | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |      |      |      |     |       |       |      | $\delta$ , %, при $t$ , °C |     |     |      |     |      |      |
|----------------------------|--------------------------------|------|------|------|-----|-------|-------|------|----------------------------|-----|-----|------|-----|------|------|
|                            | 20                             | 500  | 600  | 700  | 800 | 900   | 1000  | 1100 | 20                         | 500 | 600 | 700  | 800 | 900  | 1000 |
| <b>Стали</b>               |                                |      |      |      |     |       |       |      |                            |     |     |      |     |      |      |
| 45Х14Н1УВ2М                | 720                            | 630  | 540  | 340  | 220 | —     | —     | —    | 20                         | 18  | 20  | 32   | 40  | —    | —    |
| 40Х12Н8Г8МФБ               | 900                            | 680  | 630  | 460  | 390 | 250   | —     | —    | 18                         | 11  | 10  | 9    | 9   | 8    | —    |
| 10Х12Н2Т3МР                | 1000                           | 900  | 850  | 700  | 470 | —     | —     | —    | 9                          | 9   | 10  | 10   | 17  | —    | —    |
| 10ХН35ВТЮ                  | 1300                           | 1200 | 1110 | 1000 | 700 | 400*1 | —     | —    | 15                         | 12  | 12  | 9    | 15  | 22*1 | —    |
| 40Х12Н8Г8МФЛ               | 800                            | 550  | 500  | 370  | 280 | —     | —     | —    | 19                         | 32  | 32  | 29   | 20  | —    | —    |
| 15Х12Н25Т3МЗВ4Л            | 900                            | —    | 800  | —    | 500 | —     | —     | —    | 12                         | —   | 5   | —    | 5   | —    | —    |
| <b>Никелевые сплавы:</b>   |                                |      |      |      |     |       |       |      |                            |     |     |      |     |      |      |
| ХН78Т                      | 780                            | —    | —    | 400  | 180 | 110   | 65    | 45   | 40                         | —   | —   | 35   | 70  | 90   | 100  |
| ХН60В*2                    | 800                            | —    | —    | 530  | 400 | 230   | 140   | 85   | —                          | —   | —   | —    | —   | —    | —    |
| ХН77ТЮР                    | 1000                           | —    | 950  | 840  | 560 | 400*1 | —     | —    | 24                         | —   | 24  | 22   | 15  | 18*1 | —    |
| ХН70ВМТЮ                   | 1150                           | —    | 1000 | 900  | 740 | 500   | —     | —    | 20                         | —   | 17  | 10   | 9   | 15   | —    |
| ХН55ВМТФКЮ                 | 1200                           | —    | 950  | 850  | 650 | —     | 300   | —    | 12                         | —   | 10  | 10   | 10  | 17   | 20   |
| ХН62МВТЮ                   | 1250                           | —    | 980  | 980  | 930 | 620   | 300   | —    | 18                         | —   | 18  | 10   | 8   | 12   | 17   |
| ВЛ7—45У                    | 500                            | —    | —    | 400  | 300 | —     | —     | —    | 7                          | —   | —   | 5,5  | 10  | —    | —    |
| ЖС3                        | 750                            | —    | —    | —    | 560 | 300   | —     | —    | 8,5                        | —   | —   | —    | 3   | 4    | —    |
| ЖС6                        | 1050                           | —    | —    | —    | 850 | 780   | 480   | —    | 1                          | —   | —   | —    | 0,5 | 2,5  | 6    |
| ЖС6К                       | 1000                           | —    | —    | —    | 920 | 780   | 530   | —    | 2,5                        | —   | —   | —    | 2   | 2    | 4,5  |
| ЭП23                       | 1250                           | —    | —    | —    | —   | 940   | 720   | 450  | 2                          | —   | —   | —    | —   | 6    | 13   |
| <b>Кобальтовые сплавы:</b> |                                |      |      |      |     |       |       |      |                            |     |     |      |     |      |      |
| ЛК4                        | 700                            | —    | 520  | 470  | 400 | 270   | —     | —    | 8                          | —   | 12  | 10   | 6,5 | 9    | —    |
| ЛК4Я                       | 900                            | —    | 750  | 700  | 510 | 350   | 260*3 | —    | 5,5                        | —   | 11  | 12,5 | 14  | 18   | 25*3 |
| 4К66Я                      | 900                            | —    | —    | 750  | 550 | 375   | 295*3 | —    | 6                          | —   | —   | 10,5 | 16  | 25   | 19*3 |

\*1 При температуре 850 °C.

\*2  $\sigma_{1200} = 43$  МПа.

\*3 При температуре 950 °C.

Таблица 3.42. Прочность при высоких температурах сплавов на основе тугоплавких металлов, керамики и композиционных материалов на никелевой матрице [3,14,24]

| Материал                | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 20                             | 1000 | 1100 | 1200 | 1400 | 1500 | 1800 | 1900 | 2000 | 2200 | 2400 |
| <i>Ниобиевые сплавы</i> |                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| ВН2                     | 650                            | 400  | 300  | —    | —    | 80   | —    | —    | —    | —    | —    |
| ВН3                     | 780                            | —    | 450  | 270  | —    | 125  | —    | —    | —    | —    | —    |
| ВН4                     | 810                            | —    | 700  | 550  | —    | 170  | —    | —    | —    | —    | —    |
| РН6                     | 890                            | —    | —    | 290  | —    | —    | 90   | —    | —    | —    | —    |

| Материал                                             | $\sigma_B$ , МПа, при $t$ , °C |      |      |       |       |      |       |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|
|                                                      | 20                             | 1000 | 1100 | 1200  | 1400  | 1500 | 1800  | 1900 | 2000 | 2200 | 2400 |
| <i>Молибденовые сплавы</i>                           |                                |      |      |       |       |      |       |      |      |      |      |
| BM1                                                  | 860                            | —    | —    | 500   | 190   | 140  | 100   | —    | —    | —    | —    |
| BM2                                                  | 750                            | —    | —    | 450   | 300   | 160  | 90    | —    | 80   | —    | —    |
| MP—47ВП                                              | 780                            | —    | —    | —     | —     | 150  | 60    | —    | —    | —    | —    |
| ЦМВ-30                                               | —                              | —    | —    | —     | —     | 160  | 63    | —    | —    | —    | —    |
| <i>Вольфрамовые сплавы (порошковые)</i>              |                                |      |      |       |       |      |       |      |      |      |      |
| Вольфрам                                             | —                              | —    | —    | —     | —     | —    | —     | —    | 80   | 60   | 30*4 |
| Вольфрам—50Mo                                        | —                              | —    | —    | —     | —     | —    | 140*1 | 45   | —    | 35   | 13   |
| W—1ThO <sub>2</sub>                                  | —                              | —    | —    | —     | —     | —    | 260*1 | 190  | —    | 90   | —    |
| W—2ThO <sub>2</sub>                                  | —                              | —    | —    | —     | —     | —    | 200*1 | 180  | —    | 120  | 70   |
| W—30Re, литой                                        | 2180                           | —    | 1195 | —     | —     | —    | 210*1 | 140  | —    | —    | —    |
| <i>Хромовые сплавы</i>                               |                                |      |      |       |       |      |       |      |      |      |      |
| BX2                                                  | 400                            | —    | —    | 165*2 | —     | 45   | —     | —    | —    | —    | —    |
| BX4                                                  | 1080                           | 210  | —    | 100*2 | —     | —    | —     | —    | —    | —    | —    |
| <i>Композиционные материалы</i>                      |                                |      |      |       |       |      |       |      |      |      |      |
| Никель—2,5HfO <sub>2</sub>                           | 525                            | 150  | 105  | 85    | —     | —    | —     | —    | —    | —    | —    |
| Никель—50 углеродного волокна                        | 560                            | 240  | —    | —     | —     | —    | —     | —    | —    | —    | —    |
| ЖСК6—50 вольфрамовой проволоки                       | 580                            | 540  | 380  | —     | 290*3 | —    | —     | —    | —    | —    | —    |
| <i>Керамика (<math>\sigma_B</math> — при изгибе)</i> |                                |      |      |       |       |      |       |      |      |      |      |
| 30Cr—70Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 390                            | 230  | —    | —     | 175*3 | —    | —     | —    | —    | —    | —    |
| Из оксида Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | 150                            | 95   | —    | 76    | 60    | 36   | —     | —    | —    | —    | —    |
| Твердый сплав                                        | 1500                           | —    | —    | 800   | —     | —    | —     | —    | —    | —    | —    |

\*1 При температуре 1650 °C.

\*2 При 1150 °C.

\*3 При 1300 °C.

\*4 При 2500 °C.

Таблица 3.43. Длительная прочность и ползучесть сталей и титановых сплавов [3,10,24]

| Сталь, сплав     | $\sigma_{100}$ , МПа, при $t$ , °C |     |       |       |       |       |     | $\sigma_{0,2/100}$ , МПа, при $t$ , °C |     |       |       |       |      |  |
|------------------|------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|----------------------------------------|-----|-------|-------|-------|------|--|
|                  | 300                                | 350 | 400   | 450   | 500   | 550   | 600 | 300                                    | 350 | 400   | 450   | 500   | 550  |  |
| Стали            |                                    |     |       |       |       |       |     |                                        |     |       |       |       |      |  |
| 30ХМ             | —                                  | —   | 740*1 | 580*1 | 380*1 | 260*1 | —   | —                                      | —   | —     | —     | 142*2 | 59*2 |  |
| 30Х2Н2ВФА        | 980                                | —   | 800   | 750   | 540   | 320   | —   | —                                      | —   | 640   | 440   | 370   | 240  |  |
| 30ХГСА           | —                                  | —   | 600*1 | 460*1 | 260*1 | 120*1 | —   | —                                      | —   | 160*1 | 110*1 | 55*1  | 22*1 |  |
| 08Х15Н9Ю         | 1050                               | —   | 850   | —     | —     | —     | —   | —                                      | —   | —     | —     | —     | —    |  |
| 08Х17Н5М3        | —                                  | —   | —     | 950   | 650   | 400   | —   | —                                      | —   | —     | —     | —     | —    |  |
| 10Х12Н2ВМФ       | —                                  | —   | —     | 730   | —     | 440   | 270 | —                                      | —   | —     | 580   | —     | 200  |  |
| 23Х13НВМФА       | —                                  | —   | 1400  | 1000  | 700   | —     | —   | —                                      | —   | 870   | 620   | 210   | —    |  |
| 13Х14НВФРА       | 950                                | —   | —     | 720   | —     | 300   | —   | 760                                    | —   | —     | 380   | —     | 180  |  |
| 10Х13Н3ВФЛ       | —                                  | —   | —     | —     | 450   | 300   | 220 | —                                      | —   | 460   | 310   | 215   | 180  |  |
| Титановые сплавы |                                    |     |       |       |       |       |     |                                        |     |       |       |       |      |  |
| BT5-1            | —                                  | 450 | —     | —     | —     | —     | —   | 400                                    | 330 | —     | —     | —     | —    |  |
| OT4              | —                                  | 480 | 390   | —     | —     | —     | —   | —                                      | 300 | 190   | 50    | —     | —    |  |
| BT6C             | —                                  | 500 | —     | —     | 140   | —     | —   | —                                      | 320 | —     | —     | —     | —    |  |
| BT6              | —                                  | —   | 580   | —     | 380   | —     | —   | —                                      | —   | 360   | 140   | 60    | —    |  |
| BT3-1            | —                                  | —   | 650   | 550   | 360   | —     | —   | —                                      | —   | 300   | 160   | 50    | —    |  |
| BT8              | —                                  | —   | 750   | 650   | 450   | 380   | —   | —                                      | —   | 370   | 230   | 120   | —    |  |
| BT9              | —                                  | —   | —     | —     | 650   | 450   | 230 | —                                      | —   | —     | —     | 280   | 120  |  |
| BT14             | —                                  | —   | 680   | 540   | —     | —     | —   | —                                      | 530 | 350   | —     | —     | —    |  |
| BT5Л             | 400                                | —   | 350   | —     | —     | —     | —   | —                                      | —   | 280   | —     | 170   | —    |  |
| BT6Л             | —                                  | —   | 530   | —     | 470   | —     | —   | —                                      | —   | —     | —     | —     | —    |  |
| BT9Л             | 650                                | —   | 620   | —     | 500   | 350   | —   | 500                                    | —   | 460   | —     | 280   | 200  |  |
| BT20Л            | —                                  | 600 | —     | —     | 430   | —     | —   | —                                      | 450 | —     | —     | 160   | —    |  |
| BT21Л            | —                                  | —   | 600   | —     | 440   | —     | —   | —                                      | —   | 430   | —     | 180   | —    |  |

\*1 За 200 ч.

\*2 За 10 000 ч.



**Таблица 3.44. Длительная прочность и ползучесть алюминиевых деформируемых сплавов [3,5,24]**

| Сплав, состояние, полуфабрикат              | $\sigma_{100}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     | $\sigma_{0.2/100}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                             | 125                                | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 | 125                                    | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 |
| Д16Т, Д16Т1, лист                           | 340                                | 300 | 230 | 180 | —   | —   | 180                                    | 180 | 120 | 85  | —   | —   |
| Д16чТ, Д16ЗТ, плита                         | 345                                | 315 | 270 | —   | —   | —   | 300                                    | 270 | 235 | —   | —   | —   |
| Д16чТ, Д16ЗТ, прессованный профиль          | 340                                | 320 | 270 | 210 | —   | —   | —                                      | 260 | 210 | —   | —   | —   |
| ВД17Т1, прессованная полоса                 | —                                  | —   | —   | 190 | 100 | 55  | —                                      | —   | —   | 160 | 75  | 35  |
| АК4-1Т1, лист                               | 280                                | 250 | 210 | 170 | —   | —   | 250                                    | 220 | 145 | 90  | —   | —   |
| АК4-1Т1, плита                              | 350                                | 330 | 240 | —   | —   | —   | 280                                    | 250 | 160 | —   | —   | —   |
| Д20Т1, поковка, прессованный профиль, плита | 290                                | 250 | 220 | 180 | —   | —   | 240                                    | 200 | 140 | 130 | —   | —   |
| Д20Т2, прессованная полоса                  | —                                  | 300 | 210 | 180 | 125 | 80  | —                                      | 200 | 170 | 120 | 80  | 65  |
| Д21Т1, лист                                 | 370                                | 330 | 240 | 170 | —   | —   | 290                                    | 250 | 170 | 105 | —   | —   |
| Д21Т1, плита                                | 370                                | 330 | 260 | 200 | 120 | —   | 310                                    | 280 | 220 | 160 | 95  | —   |
| В95Т1, лист                                 | —                                  | 230 | —   | 100 | —   | —   | —                                      | —   | —   | —   | —   | —   |

**Таблица 3.45. Длительная прочность жаропрочных сталей и сплавов [3,24]**

| Сталь, сплав | $\sigma_{100}$ , МПа, при $t$ , °C |     |     |     |     |      |
|--------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
|              | 600                                | 700 | 800 | 900 | 950 | 1000 |

*Стали*

|               |     |     |      |   |   |   |
|---------------|-----|-----|------|---|---|---|
| 45Х14Н14В2М   | 300 | 180 | 80   | — | — | — |
| 38Х12Н8Г8МФБ  | 450 | 250 | 150  | — | — | — |
| 10Х12Н20ТЗР   | 580 | 390 | 280* | — | — | — |
| 10Х14Н35МЗТЮ  | 700 | 450 | 250  | — | — | — |
| 15Х10Н22ВМТЛ  | —   | 400 | 200  | — | — | — |
| 30Х12Н10Г8ВФЛ | 400 | 280 | 140  | — | — | — |

*Никелевые сплавы*

|            |     |     |     |       |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|
| ХН77ТЮ     | 580 | 400 | 150 | —     | —   | —   |
| ХН35ВТЮ    | 670 | 390 | 230 | —     | —   | —   |
| ХН77ТЮР    | 680 | 420 | 200 | —     | —   | —   |
| ХН70ВМТЮ   | —   | 500 | 290 | 190** | —   | —   |
| ХН55ВМТФКЮ | —   | 700 | 440 | 200   | —   | 80  |
| ХН62МВКЮ   | —   | 750 | 450 | 200   | 120 | —   |
| ХН78Т      | —   | 105 | 45  | 15    | —   | —   |
| ХН75МБТЮ   | —   | 165 | 80  | 29    | —   | —   |
| ЖСЗ        | —   | —   | 300 | 100   | —   | —   |
| ЖС6        | —   | —   | 500 | 280   | —   | 140 |
| ЖС6К       | —   | —   | 520 | 320   | —   | 155 |

*Кобальтовые сплавы*

|       |     |     |     |     |     |   |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| ЛК4   | 300 | 250 | 150 | 70  | 50  | — |
| ЛК4Я  | —   | 300 | 180 | 140 | 110 | — |
| 4К66Я | —   | —   | 250 | 150 | 120 | — |

**Таблица 3.46. Длительная прочность сплавов на основе тугоплавких металлов и композиционных материалов на никелевой матрице [3,14,24]**

| Материал | $\sigma_{100}$ , МПа, при $t$ , °C |      |      |      |      |
|----------|------------------------------------|------|------|------|------|
|          | 1100                               | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 |

*Ниобиевые сплавы*

|      |     |     |   |   |   |
|------|-----|-----|---|---|---|
| ВН2  | 90  | —   | — | — | — |
| ВН3  | 160 | —   | — | — | — |
| ВН4  | 280 | —   | — | — | — |
| ВН5А | 140 | —   | — | — | — |
| РН6  | —   | 110 | — | — | — |
| МН1  | 250 | 110 | — | — | — |
| МН2  | 360 | 260 | — | — | — |

*Молибденовые сплавы*

|        |   |     |    |    |    |
|--------|---|-----|----|----|----|
| ЦМ2А   | — | 90  | 65 | 40 | —  |
| ВМ1    | — | 90  | —  | —  | —  |
| ВМ2    | — | 155 | —  | 50 | —  |
| ЦМ6    | — | 130 | 40 | —  | —  |
| ЦМВ-30 | — | 250 | —  | —  | 5* |

*Хромовые сплавы*

|          |   |       |   |   |   |
|----------|---|-------|---|---|---|
| ВХ1, ВХ2 | — | 45**  | — | — | — |
| ВХ3      | — | 150** | — | — | — |

*Вольфрамовые сплавы*

|                      |   |   |   |    |    |
|----------------------|---|---|---|----|----|
| Вольфрам технический | — | — | — | 70 | 60 |
|----------------------|---|---|---|----|----|

*Композиционные материалы*

|                                |     |    |   |   |   |
|--------------------------------|-----|----|---|---|---|
| ЖС6—50% вольфрамовой проволоки | 150 | 80 | — | — | — |
| Никель — 2,5% ThO <sub>2</sub> | 105 | 80 | — | — | — |
| Никель — 2,5% HfO <sub>2</sub> | 70  | 50 | — | — | — |

\* При температуре 750°C.

\*\* При 850°C.

\* При температуре 1800 °C.

\*\* При 1150 °C.

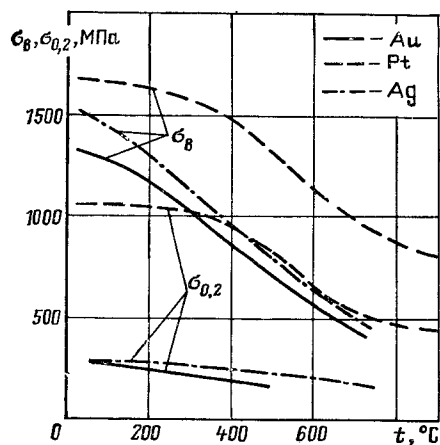


Рис. 3.8. Пределы прочности и текучести золота, платины и серебра при высоких температурах [3, 6, 8]

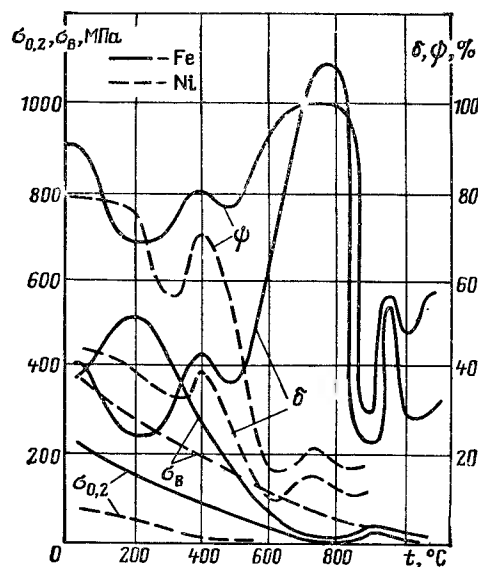


Рис. 3.9. Механические свойства железа и никеля при высоких температурах [6, 10]

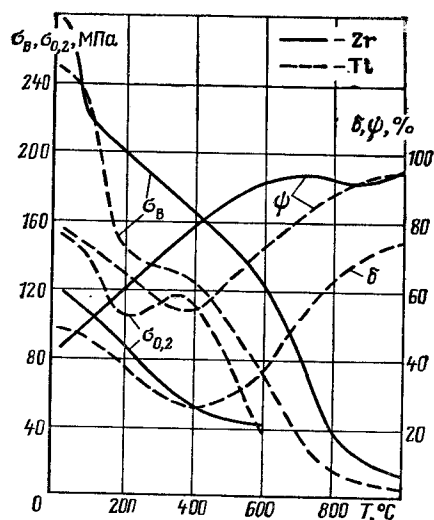


Рис. 3.10. Механические свойства сверхчистых циркония и титана при высоких температурах [6]

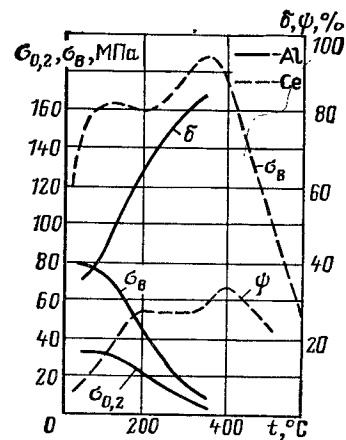


Рис. 3.11. Механические свойства алюминия и церия при высоких температурах [4, 6, 18]

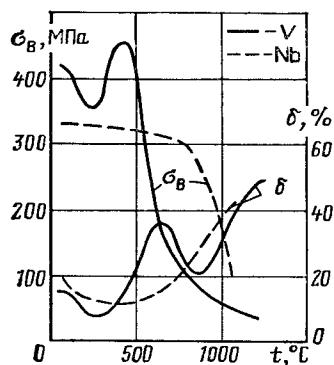


Рис. 3.12. Механические свойства ванадия и ниобия при высоких температурах [3, 6]

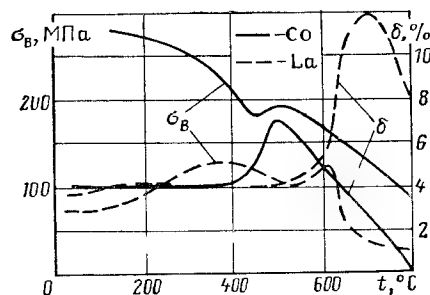


Рис. 3.13. Механические свойства лантана и кобальта при высоких температурах [3, 6]

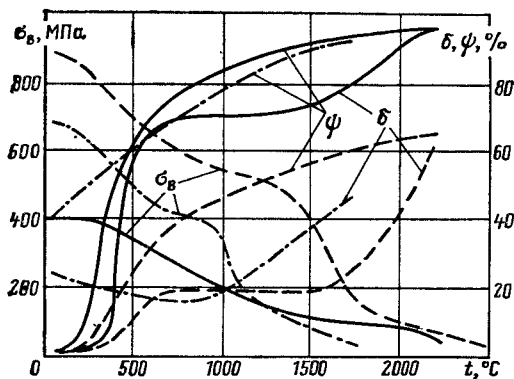


Рис. 3.14. Механические свойства вольфрама и молибдена при высоких температурах [3, 6]:  
— вольфрам после отжига; — — — вольфрам на-  
гартованный; - - - - - молибден после отжига

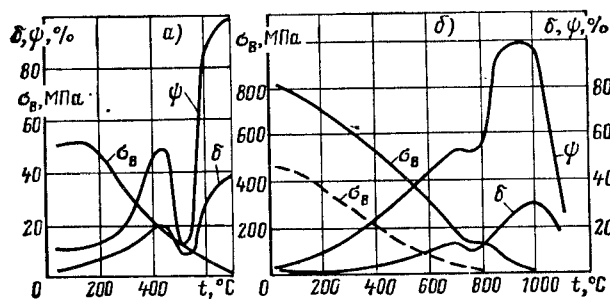


Рис. 3.15. Механические свойства стронция, урана и бериллия при высоких температурах [6]:  
а — стронций литой; б — уран; — — — бериллий

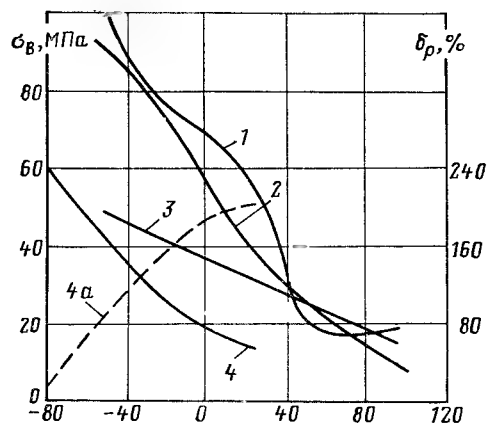


Рис. 3.16. Зависимость прочности некоторых неметаллических материалов от температуры испытания [24]:  
1 — капрон (при изгибе); 2 — ПТХЭ (фторопласт-3) при изгибе; 3 — полиэтилен; 4 — морозостойкая резина; 4а — удлинение при разрыве морозостойкой резины

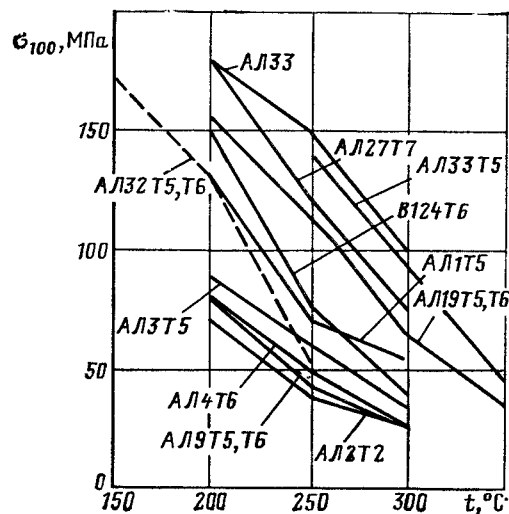


Рис. 3.17. Пределы длительной прочности алюминиевых литейных сплавов [3, 5]

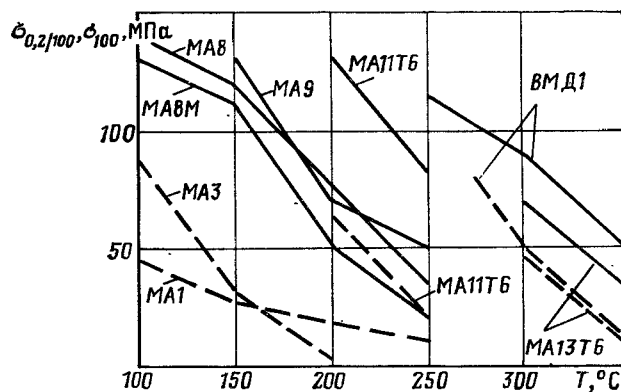


Рис. 3.18. Пределы длительной прочности (—) и ползучести (---) магниевых деформируемых сплавов [3]

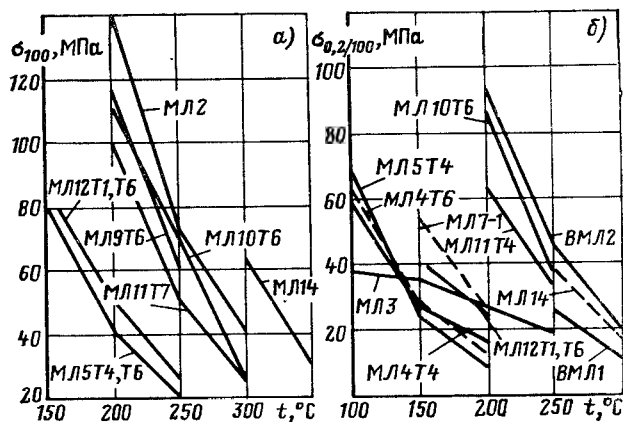


Рис. 3.19. Пределы длительной прочности (а) и ползучести (б) магниевых литейных сплавов [3]

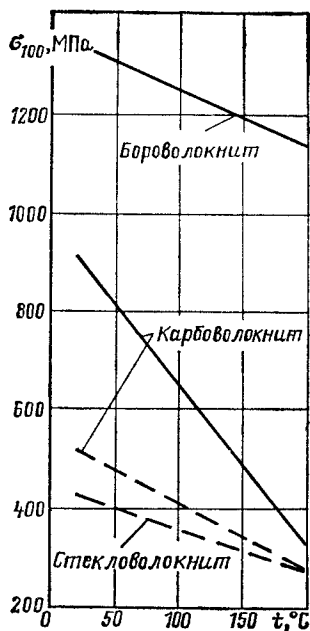


Рис. 3.20. Пределы длительной прочности композиционных материалов на полимерной матрице [13] при растяжении (—) и изгибе (---)



Рис. 3.21. Пределы ползучести жаропрочных сталей и никелевых сплавов [3]

### 3.4. ВЫНОСЛИВОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Методы определения характеристик выносливости при многоциклового и малоциклового усталости регламентируются в ГОСТ 25.502—79. Малоциклового усталость характеризуется базой испытаний  $N \leq 5 \cdot 10^4$  циклов и пониженной частотой нагружения  $f = 0,1 \div 5$  Гц, а многоциклового усталость —  $N \geq 10^7$ ,  $f = 20 \div 50$  Гц. Повреждение или разрушение в многоциклового области происходит в основном при упругом, а в малоциклового — при упруго-пластическом деформировании.

Таблица 3.47. Пределы выносливости сталей при знакопеременном изгибе

| Сталь, сплав                         | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа | $\sigma_{-1}^H$ , МПа<br>( $K_t^{-1} \approx 2,2$ ) |
|--------------------------------------|------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|
| Стали, $N = 10^7$ циклов [3, 20, 24] |                  |                     |                                                     |
| 20                                   | 400              | 210                 | —                                                   |
| 35                                   | 600              | 330                 | —                                                   |
| 45                                   | 950              | 530                 | 280                                                 |
| 30ХМА                                | 950              | 420                 | 260                                                 |
| 30ХМА                                | 1600             | 620                 | —                                                   |
| 30ХГСА                               | 900              | 480                 | 220                                                 |
| 20Х3МВФ                              | 920              | 530                 | 200                                                 |
| 12Х2НВФА                             | 960              | 520                 | 310                                                 |
| 38ХА                                 | 1050             | 500                 | 330                                                 |
| 30Х3ВА                               | 1050             | 610                 | 350                                                 |
| 30Х2Н2ВФА                            | 1180             | 560                 | 360                                                 |
| 37ХНЗА                               | 1250             | 560                 | 310                                                 |
| 40ХН2МА                              | 1300             | 580                 | —                                                   |
| 40ХН2МА                              | 1600             | 660                 | 370                                                 |
| 23Х2НВФА                             | 1350             | 645                 | 380                                                 |
| 25Х2ГНТА                             | 1500             | 610                 | 360                                                 |
| 25Х2ГНТА                             | 1600             | 700                 | 440                                                 |
| 30ХГСНА                              | 1650             | 700                 | 490                                                 |
| 30ХГСНА                              | 1750             | 730                 | —                                                   |
| 40ХН2СМА                             | 1800             | 700                 | —                                                   |
| 40ХН2СМА                             | 2000             | 830                 | 550                                                 |
| 12Х18Н9Т                             | 580              | 285                 | 245                                                 |
| 20Х13                                | 950              | 480                 | 240                                                 |
| 09Х15Н8Ю                             | 1350             | 620                 | —                                                   |
| 13Х12Н2ВМФА                          | 1200             | 600                 | 400                                                 |
| 23Х13НВМФА                           | 1600             | 600                 | 450                                                 |
| 12Х13НЗВФЛ                           | 900              | 420                 | 280                                                 |
| 10Х17НЗСЛ                            | 1000             | 410                 | 260                                                 |

Титановые сплавы [3, 10, 24],  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов

|                  |      |      |      |
|------------------|------|------|------|
| ВТ1-0, лист      | 415  | 185  | —    |
| ВТ1-1, »         | 450  | 230  | —    |
| 0Т4-1, »         | 650  | 340  | —    |
| 0Т4, »           | 750  | 380  | —    |
| ВТ5-1, 0Т4, лист | 750  | 400  | —    |
| ВТ5, прут        | 850  | 450  | 310  |
| ВТ6С, лист       | 950  | 500* | 420* |
| ВТ6, прут        | 1100 | 550* | 300* |
| ВТ20, лист       | 950  | 420  | —    |
| ВТ14, »          | 900  | 400  | —    |
| ВТ14, »          | 1200 | 420  | —    |
| ВТ3-1, прут      | 1000 | 480  | —    |
| ВТ3-1, »         | 1100 | 560* | 390* |
| ВТ3-1, »         | 1200 | 620* | —    |
| ВТ22, »          | 1100 | 530  | 330  |
| ВТ8, »           | 1050 | 500  | —    |
| ВТ9, »           | 1150 | 540  | —    |
| ВТ5Л             | 800  | 280  | 250  |
| ВТ14Л            | 950  | 270  | 230  |
| ВТ6Л             | 850  | 200  | —    |
| ВТ9Л             | 1000 | 180  | 180  |
| ВТ3-1Л           | 1000 | 220  | 220  |

\* База испытаний  $N = 10^7$  циклов.

Таблица 3.48. Пределы выносливости  
алюминиевых сплавов при знакопеременном изгибе  
на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов [3, 5, 20]

| Сплав, состояние, полуфабрикат                          | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа | $\sigma_{-1}^H$ , МПа<br>( $K_f = 2,2$ ) |
|---------------------------------------------------------|------------------|---------------------|------------------------------------------|
| АД1М, лист                                              | 80               | 35*                 | —                                        |
| АД1Н, »                                                 | 150              | 50                  | —                                        |
| АМг3М, »                                                | 230              | 80                  | —                                        |
| АМг5М, »                                                | 300              | 110                 | —                                        |
| АМг6М, лист, прессованный<br>профиль                    | 340              | 100                 | —                                        |
| АД31Т1, прессованный профиль                            | 250              | 90                  | 50                                       |
| АД33Т1, то же                                           | 320              | 110                 | 60                                       |
| АД35Т1, »                                               | 330              | 110                 | —                                        |
| АВТ1, »                                                 | 350              | 115                 | 65                                       |
| Д1Т, Д1чТ, штамповка                                    | 410              | 140                 | —                                        |
| Д16чТ, плита, профиль                                   | 440              | 140                 | 80                                       |
| Д16чТ1, лист                                            | 470              | 120                 | —                                        |
| Д16чТ1, прессованная панель                             | 480              | 140                 | —                                        |
| Д19Т, Д19чТ, прессованный<br>профиль                    | 480              | 160                 | —                                        |
| ВАД1Т, лист                                             | 440              | 120                 | —                                        |
| Д20Т1, лист, прессованный<br>профиль                    | 420              | 130                 | 70                                       |
| Д21Т1, поковка, штамповка                               | 430              | 110                 | —                                        |
| АК4-1Т1, плита, прессованный<br>профиль                 | 420              | 120                 | 80                                       |
| АК6Т1, штамповка                                        | 420              | 130                 | 80                                       |
| АК8Т1, прессованный профиль                             | 480              | 135                 | 85                                       |
| ВД17Т1, прессованная полоса                             | 520              | 155                 | 90                                       |
| В92Т1, прессованный пруток                              | 450              | 150                 | —                                        |
| В95пчТ1, лист, плита                                    | 570              | 160                 | 90                                       |
| В95пчТ1, прессованная панель                            | 600              | 180                 | —                                        |
| В95пчТ2, лист, плита, поков-<br>ка, прессованная панель | 540              | 160                 | —                                        |
| В95пчТ3, прессованная панель                            | 500              | 160                 | —                                        |
| В95пчТ3, поковка                                        | 510              | 140                 | —                                        |
| В93пчТ1, поковка                                        | 520              | 140                 | 80                                       |
| В93пчТ2, »                                              | 470              | 140                 | —                                        |
| В93пчТ3, »                                              | 440              | 130                 | —                                        |
| В96Ц3Т1, штамповка                                      | 630              | 170                 | —                                        |
| САП1, прессованная полоса                               | 300              | 80                  | 60                                       |
| САП2, прессованный профиль                              | 350              | 90                  | 60                                       |
| САП3, прессованный пруток                               | 400              | 115                 | 75                                       |
| САС1-400                                                | 270              | 80                  | —                                        |
| САС1-50                                                 | 340              | 90                  | —                                        |
| АЛ1Т5                                                   | 260              | 56*                 | —                                        |
| АЛ4Т6                                                   | 260              | 70                  | —                                        |
| АЛ4МТ5                                                  | 350              | 90**                | —                                        |
| АЛ5Т5                                                   | 260              | 65*                 | —                                        |
| АЛ8Т4                                                   | 300              | 50*                 | —                                        |
| АЛ9Т5                                                   | 210              | 45*                 | —                                        |
| АЛ9-1Т5***                                              | 270              | 80                  | —                                        |
| АЛ19Т5                                                  | 360              | 70                  | —                                        |
| АЛ19Т5***                                               | 400              | 90                  | —                                        |
| АЛ20Т2, АЛ21Т2                                          | 210              | 70                  | —                                        |
| АЛ20Т7, АЛ21Т7                                          | 240              | 75                  | —                                        |
| АЛ23-1Т4                                                | 230              | 40                  | —                                        |
| АЛ27Т4                                                  | 360              | 60                  | —                                        |
| АЛ27-1                                                  | 390              | 80                  | 50                                       |
| АЛ27-1Т4                                                | 380              | 70                  | —                                        |
| АЛ33Т5                                                  | 280              | 75                  | —                                        |
| ВАЛ8Т5***                                               | 400              | 110                 | —                                        |

\* База испытаний  $N = 5 \cdot 10^3$  циклов.

\*\* База испытаний  $N = 10^7$  циклов.

\*\*\* Литые в кокиль, остальные — в землю.

Характеристики выносливости зависят от формы и размеров образца, а также способа и частоты нагружения. С понижением частоты нагружения и увеличением абсолютных размеров образца сопротивление усталости падает. Выносливость металлических материалов существенно зависит от состояния поверхности и определяется, как правило, на полированных образцах; пластмассы менее чувствительны к чистоте поверхности.

Большая часть данных по многоциклового усталости получена при испытаниях на изгиб симметричным циклом с определением  $\sigma_{-1}$ . Для ориентировочной оценки пределов выносливости при других видах напряженного состояния можно использовать следующие соотношения: для конструктивных сталей предел выносливости при растяжении — сжатии  $\sigma_{-1}^P = (0,8 \div 0,9) \sigma_{-1}$ , при кручении  $\tau_{-1} = (0,5 \div 0,6) \sigma_{-1}$ ; для алюминиевых сплавов эти коэффициенты составляют 0,85—0,95 и 0,55—0,65 соответственно.

Для некоторых групп материалов установлены зависимости между пределами выносливости и прочности. Отношение  $\sigma_{-1}/\sigma_B$  для сталей составляет 0,35—0,55 при базе испытания  $2 \cdot 10^7$  циклов, для титановых сплавов 0,45—0,55 при  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов; при этом более высокопрочным материалам отвечают меньшие значения  $\sigma_{-1}/\sigma_B$ . Для неметаллических материалов (текстолиты, органические стекла и др.)  $\sigma_{-1} = (0,2 \div 0,3) \sigma_B$  ( $N = 10^7$  циклов).

Таблица 3.49. Пределы выносливости  
магниевого сплава при знакопеременном изгибе  
на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов [3]

| Сплав, состояние, полуфабрикат | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа | $\sigma_{-1}^H$ , МПа<br>( $K_f = 2,2$ ) |
|--------------------------------|------------------|---------------------|------------------------------------------|
| МА2-1, плита                   | 270              | 105*                | 70*                                      |
| МА3, полоса                    | 280              | 115                 | —                                        |
| МА5Т4, пруток                  | 320              | 130                 | 100                                      |
| МА14-Т1, полоса                | 340              | 120                 | 80                                       |
| МА10Т6, пруток                 | 430              | 125                 | 80                                       |
| МА11Т6, »                      | 280              | 85                  | 50                                       |
| МА13Т8, лист                   | 240              | 70                  | —                                        |
| ВМД1, пруток                   | 280              | 70                  | 50                                       |
| МА1М, »                        | 240              | 75                  | —                                        |
| МА2, »                         | 270              | 100*                | —                                        |
| МА8, полоса                    | 260              | 80                  | —                                        |
| МЛ4                            | 170              | 80                  | 65                                       |
| МЛ4Т4                          | 235              | 90                  | 80                                       |
| МЛ4Т6                          | 240              | 80                  | 70                                       |
| МЛ5, МЛ6                       | 150              | 85                  | 70                                       |
| МЛ5Т4                          | 240              | 100                 | 80                                       |
| МЛ5Т6, МЛ6Т6                   | 240              | 85                  | 70                                       |
| МЛ6Т4                          | 235              | 95                  | 75                                       |
| МЛ12                           | 210              | 50                  | 50                                       |
| МЛ12Т1                         | 230              | 75                  | 70                                       |
| МЛ12Т6                         | 250              | 80                  | —                                        |
| МЛ15Т1                         | 215              | 90                  | 70                                       |
| МЛ9Т6                          | 240              | 80                  | —                                        |
| МЛ10Т6                         | 240              | 70                  | —                                        |
| МЛ11Т4, Т6                     | 155              | 70                  | —                                        |
| МЛ14                           | 200              | 50                  | —                                        |
| ВМЛ2                           | 260              | 60                  | —                                        |
| МЛ3, МЛ7-1                     | 180              | 55                  | —                                        |

\* База испытаний  $N = 5 \cdot 10^3$ .

Таблица 3.50. Влияние температуры на пределы выносливости жаропрочных сталей и никелевых сплавов при знакопеременном изгибе на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов [3]

| Сплав        | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа, при $t$ , °C |     |      |     |     | $\sigma_{-1}^H$ ( $K_t = 2,2$ ), МПа, при $t$ , °C |     |     |     |
|--------------|------------------|-----------------------------------|-----|------|-----|-----|----------------------------------------------------|-----|-----|-----|
|              |                  | 20                                | 600 | 700  | 800 | 900 | 600                                                | 700 | 800 | 900 |
| 10X12H20T3P  | 900              | —                                 | 330 | 280  | —   | —   | —                                                  | —   | —   | —   |
| 10X13H35M3TЮ | 1000             | —                                 | —   | 300  | 260 | —   | —                                                  | —   | —   | —   |
| 08X35BT10    | 1150             | —                                 | —   | 300* | 230 | —   | —                                                  | —   | —   | —   |
| ХН77ТЮ       | 1000             | 360                               | 390 | 360  | 300 | —   | —                                                  | —   | —   | —   |
| ХН77ТЮР      | 1000             | 370                               | 360 | 390  | 300 | —   | 240                                                | 250 | 230 | —   |
| ХН55ВМТФКЮ   | 1100             | —                                 | —   | 350  | 360 | 300 | —                                                  | 270 | 270 | 270 |
| ХН62МВКЮ     | 1180             | —                                 | —   | 300  | 305 | 300 | —                                                  | 255 | 255 | 255 |
| ХН70ВМТЮ     | 1150             | —                                 | 350 | 370  | 365 | 250 | —                                                  | 290 | 270 | 190 |
| ЖСЗ          | 750              | —                                 | —   | —    | 300 | —   | —                                                  | —   | —   | —   |
| ЖС6**        | 1040             | 270                               | —   | —    | 270 | 260 | —                                                  | —   | —   | —   |
| ЖС6К**       | 1000             | 280                               | —   | —    | 280 | 290 | —                                                  | —   | —   | —   |
| ВЛ7-45У      | 500              | 260                               | —   | —    | 160 | —   | —                                                  | —   | —   | —   |

\* При температуре 750 °C.

\*\* При 1000 °C ( $\sigma_{-1} = 220$  МПа)

Композиционные волокнистые материалы отличаются повышенным отношением  $\sigma_{-1}/\sigma_B = 0,6 \div 0,8$  ( $N = 10^7$  циклов).

В табл. 3.47—3.53 и на рис. 3.22—3.24 представлены следующие характеристики выносливости:

$\sigma_{-1}$  — предел выносливости при симметричном изгибе — наибольшее напряжение цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклов или при заданной базе испытаний ( $10^7 \div 2 \cdot 10^7$  циклов);

$\sigma_{-1}^H$  — предел выносливости образца с надрезом или отверстием при  $K_t = 2,2 \div 2,6$ , где  $K_t$  — теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$\sigma_{max}$  — предел выносливости (малоциклового усталости) при асимметричном растяжении гладкого ( $K_t = 1$ ) или надрезанного ( $K_t = 2,2 \div 2,6$ ) образца — наибольшее напряжение цикла, при котором не происходит разрушения при заданной базе испытания;

$N$  — долговечность — число циклов, выдерживаемых

Таблица 3.51. Значения пределов выносливости композиционных материалов и пластмасс при знакопеременном изгибе на базе  $10^7$  циклов [3, 12, 14, 24]

| Материал    | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа | Материал       | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа |
|-------------|------------------|---------------------|----------------|------------------|---------------------|
| Боралюминий | 1250             | 650                 | Бороволокнит   | 1300             | 420                 |
|             | 1150             | 600                 | Карбоволокнит  | 1020             | 500                 |
|             | 1100             | 550                 |                | 650              | 300                 |
| Боромангний | 1200             | 550                 |                |                  |                     |
|             | 1200             | 400                 | Стекловолокнит | 350              | 90                  |
|             | 650              | 170                 | Оргстекло      | 62,5             | 17—30               |

образцом перед разрушением при заданном напряжении, база испытаний.

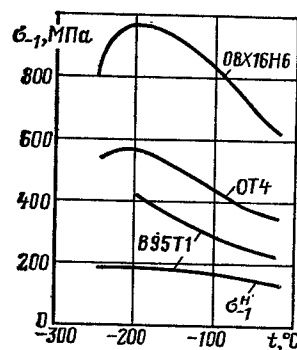


Рис. 3.22. Влияние низких температур на предел выносливости (база  $10^6$  циклов) некоторых сплавов [3]

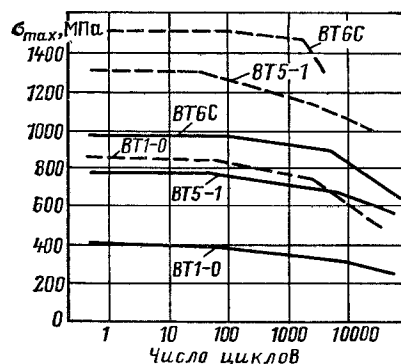


Рис. 3.23. Кривые малоциклового усталости титановых сплавов [10] при температуре 20 (—) и 196 °C (---)

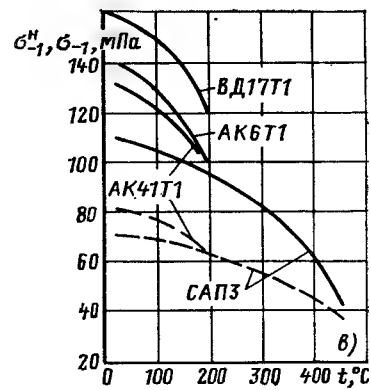
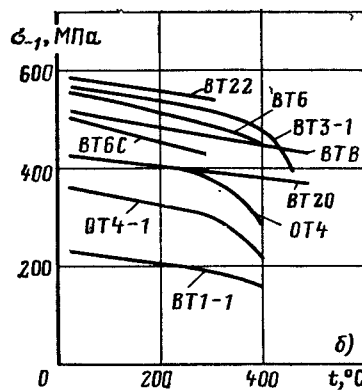
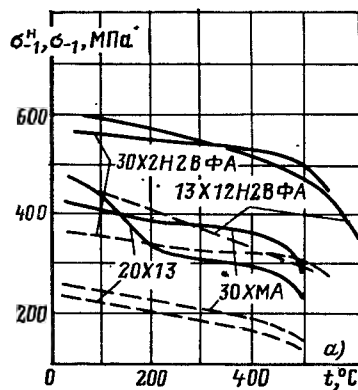


Таблица 3.52. Малоцикловая усталость при асимметричном растяжении\* [3,5,10,20,24,27,30,31]

| Сталь, сплав, полуфабрикат       | $\sigma_B$ , МПа | $K_t$ | База испытаний $N$ , $10^3$ циклов | $\sigma_{\max}$ , МПа |
|----------------------------------|------------------|-------|------------------------------------|-----------------------|
| 30ХГСА, пруток                   | 1000             | 1     | 50                                 | 650                   |
| То же                            | 1000             | 1     | 20                                 | 800                   |
| »                                | 1000             | 2,6   | 20                                 | 400                   |
| 30ХГСНА, пруток                  | 1600             | 2,6   | 100                                | 400                   |
| То же                            | 1750             | 1     | 50                                 | 900                   |
| »                                | 1750             | 1,6   | 50                                 | 650                   |
| »                                | 1750             | 2,2   | 50                                 | 500                   |
| »                                | 1750             | 4     | 50                                 | 250                   |
| ОЗХ18К8М5Т, поковка              | 1700             | 2,6   | 100                                | 450                   |
| BT1-0, лист                      | 400              | 2,6   | 20                                 | 300                   |
| BT5-1, »                         | 800              | 2,6   | 20                                 | 600                   |
| BT6C, »                          | 980              | 2,6   | 20                                 | 750                   |
| BT22, поковка                    | 1100             | 2,6   | 100                                | 350                   |
| BT23, плита                      | 1100             | 2,6   | 100                                | 330                   |
| BT5, пруток                      | 950              | 2,2   | 20                                 | 630                   |
| Д16Т, лист                       | 480              | 1     | 50                                 | 280                   |
| То же                            | 480              | 1     | 20                                 | 400                   |
| »                                | 480              | 2,5   | 20                                 | 280                   |
| »                                | 480              | 2,6   | 20                                 | 250                   |
| »                                | 480              | 2,6   | 50                                 | 180                   |
| Д16Т1, лист                      | 480              | 2,6   | 50                                 | 160                   |
| Д19Т, »                          | 470              | 2,6   | 50                                 | 180                   |
| В95Т1, »                         | 500              | 1     | 20                                 | 320                   |
| То же                            | 500              | 2,5   | 20                                 | 260                   |
| В95пчТ2, лист, плита             | 530              | 2,6   | 50                                 | 160                   |
| Д16чТ, плита                     | 470              | 2,6   | 50                                 | 200                   |
| То же                            | 470              | 2,6   | 100                                | 190                   |
| АК4-1Т2, плита                   | 430              | 2,6   | 50                                 | 185                   |
| 1201Т1, »                        | 465              | 2,6   | 50                                 | 180                   |
| В93пчТ1, Т2, Т3, штамповка       | 420—500          | 2,6   | 50                                 | 150                   |
| В95чТ2, поковка                  | 540              | 2,6   | 50                                 | 190                   |
| Д16Т, пруток                     | 480              | 2,2   | 20                                 | 430                   |
| В95Т1, »                         | 650              | 2,2   | 20                                 | 400                   |
| В95пчТ1, Т2, Т3, панель          | 480—565          | 2,6   | 50                                 | 180                   |
| Д16чТ, прессованный полуфабрикат | 440              | 2,6   | 20                                 | 250                   |
| В95Т1, то же                     | 600              | 2,6   | 20                                 | 200                   |
| ВАЛ8Т5, отливка                  | 400              | 1     | 50                                 | 200                   |
| То же                            | 400              | 2,2   | 50                                 | 180                   |
| Бороалюминий, лист               | 1250             | 1     | 800                                | 950                   |
| Боромангий, »                    | 1200             | 1     | 800                                | 800                   |

\*  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0 \div 0,1$ .

Рис. 3.24. Влияние высоких температур на предел выносливости сталей (а) [3, 31], титановых сплавов (б) [3, 10, 24], алюминиевых сплавов (в) [31, 5, 3]: —  $\sigma_{-1}$ ; — —  $\sigma_{-1}^H$

Таблица 3.53. Влияние температуры испытания на сопротивление малоцикловой усталости полосы с отверстием ( $K_t = 2,5$ ) при асимметричном растяжении\* [3,20]

| Сплав, состояние, полуфабрикат | $\sigma_B$ , МПа | База испытаний $N$ , $10^3$ циклов | $t$ , °C | $\sigma_{\max}$ , МПа |
|--------------------------------|------------------|------------------------------------|----------|-----------------------|
| Д16Т, лист                     | 470              | 20                                 | 20       | 260                   |
|                                |                  |                                    | 200      | 220                   |
| В95Т1, »                       | 550              | 20                                 | 20       | 220                   |
|                                |                  |                                    | 200      | 180                   |
| АК4-1Т1, плита                 | 430              | 50                                 | 20       | 190                   |
|                                |                  |                                    | 150      | 170                   |
| BT1-1, пруток                  | 700              | 20                                 | 20       | 390                   |
|                                |                  |                                    | 300      | 210                   |

\*  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0$ .

### 3.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Основными характеристиками разрушения являются вязкость разрушения или критический коэффициент интенсивности напряжений и скорость роста трещины усталости. Характеристики разрушения при однократном нагружении определяют на образцах с заранее выращенными усталостными трещинами. Коэффициент интенсивности напряжений  $K$  характеризует концентрацию напряжений в вершине трещины; в общем виде  $K = \sigma \sqrt{\pi l} y$ , где  $\sigma$  — напряжение в сечении брутто;  $l$  — половина длины трещины;  $y$  — функция, зависящая от геометрии образца и трещины. Критический коэффициент интенсивности напряжений определяют по моменту, при котором наступает нестабильный рост трещины.

Вязкость разрушения при плоской деформации  $K_{Ic}$  оценивают по результатам испытания внецентренным растяжением компактных образцов, толщина которых  $t = 2,5 (K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2$  обеспечивает наиболее стесненные условия для пластической деформации перед фронтом трещины.

Таблица 3.54. Вязкость разрушения при плоской деформации

| Материал, состояние, полуфабрикат | Направление вырезки образца* | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup> |
|-----------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| <i>Стали [25—27]</i>              |                              |                      |                                 |
| 20, нормализация                  | ДП                           | 400                  | 140                             |
| 15Х2НМФА, нормализация            | ДП                           | 640                  | 148                             |
| 40Х, закалка и отпуск             | ДП                           | 1250                 | 115                             |
| 40ХНМ, то же                      | ДП                           | 1500                 | 80                              |
| 30ХГСНА, изотермическая закалка   | ДП                           | 1550                 | 85                              |
| 03Н18К8М5Т, закалка и старение    | ДП                           | 1550                 | 130                             |
| 03Н18К9М5Т, то же                 | ДП                           | 1700                 | 100                             |
| То же                             | ДП                           | 1800                 | 75                              |
| »                                 | ДП                           | 2000                 | 70                              |

*Титановые сплавы [21, 26, 28]*

|                                      |    |      |     |
|--------------------------------------|----|------|-----|
| 0Т4, отжиг, штамповка                | ДП | 700  | 105 |
| ВТ5-1, отжиг, прутки                 | ДП | 750  | 98  |
| ВТ20, отжиг, поковка                 | ДП | 760  | 104 |
| ВТ6ч, отжиг, плита                   | ДП | 820  | 85  |
| ВТ3-1, отжиг, поковка                | ДП | 950  | 76  |
| ВТ3-1, закалка и старение, штамповка | ПД | 1200 | 58  |
| ВТ9, то же                           | ДП | 1050 | 78  |
| То же                                | ДП | 1150 | 58  |
| ВТ22, отжиг, штамповка               | ДП | 1080 | 73  |
| ВТ22, отжиг, плита                   | ДП | 1050 | 79  |
| ВТ22, закалка и старение, прутки     | ДП | 1250 | 54  |
| ВТ23, старение, плита                | ПД | 1080 | 73  |
| ВТ9Л, закалка и старение             | —  | 1000 | 78  |
| ВТ20Л, отжиг                         | —  | 800  | 81  |

*Алюминиевые сплавы [5, 20, 22, 28]*

|                            |    |     |    |
|----------------------------|----|-----|----|
| Д16Т, поковка              | ПД | 290 | 35 |
| », плита                   | ПД | 340 | 27 |
| », прессованная полоса     | ДП | 340 | 37 |
| Д16чТ, поковка             | ДП | 290 | 38 |
| Д16Т1, прессованная полоса | ДП | 345 | 31 |
| Д16чТ1, поковка            | ПД | 375 | 24 |
| Д16чТ1, штамповка          | ДП | 465 | 31 |
| Д16чТ1, плита              | ДП | 400 | 38 |
| То же                      | ДП | 450 | 30 |
| »                          | ПД | 460 | 26 |
| Д16чТ1, плита              | ПД | 430 | 30 |
| 1201Т1 »                   | ДП | 350 | 35 |
| То же                      | ПД | 345 | 34 |
| »                          | ВД | 350 | 25 |
| АК4-1Т1, »                 | ДП | 330 | 31 |
| То же                      | ДП | 400 | 24 |
| »                          | ПД | 360 | 22 |
| АК4-1Т1, штамповка         | ДП | 400 | 25 |
| АК6Т1, поковка             | ДП | 320 | 37 |
| АК8Т1, поковка, штамповка  | ДП | 420 | 29 |
| В95Т1, плита               | ДП | 485 | 33 |
| То же                      | ПД | 475 | 28 |
| В95чТ1, плита              | ПД | 490 | 32 |
| В95пчТ2, »                 | ДП | 460 | 36 |
|                            | ПД | 455 | 29 |

\* Первая буква обозначает направление оси образца относительно волокна, вторая — направление плоскости развития трещины.

Продолжение табл. 3.54

| Материал, состояние, полуфабрикат                                                     | Направление вырезки образца* | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| В95пчТ3, плита                                                                        | ДП                           | 440                  | 37                              |
|                                                                                       | ПД                           | 435                  | 30                              |
| В93пчТ1, штамповка                                                                    | ДП                           | 480                  | 29                              |
| В93пчТ2, »                                                                            | ДП                           | 440                  | 33                              |
| В93пчТ3, »                                                                            | ДП                           | 360                  | 35                              |
| В96Ц3Т3, »                                                                            | ДП                           | 460                  | 30                              |
| В96ЦТ1, »                                                                             | ДП                           | 560                  | 22                              |
| <i>Композиционные материалы однонаправленной структуры на полимерной матрице [12]</i> |                              |                      |                                 |
| Эпоксуглеволокнит                                                                     | ДП                           | 1050                 | 2,45                            |
| Эпоксигорволокнит                                                                     | ДП                           | 1200                 | 2,7                             |
| Эпоксистекловолокнит                                                                  | ДП                           | 1800                 | 2,9                             |

Таблица 3.55. Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии алюминиевых титановых сплавов\*

| Сплав, состояние, полуфабрикат            | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $B$ , м | $K_{IC}^y$ , МПа·м <sup>1/2</sup> |
|-------------------------------------------|----------------------|---------|-----------------------------------|
| <i>Алюминиевые сплавы [5, 20, 22, 28]</i> |                      |         |                                   |
| АМг6Н, лист холоднокатаный                | 355                  | 0,1     | 69                                |
| Д16Т, то же                               | 330                  | 0,1     | 60                                |
| То же                                     | 330                  | 0,4     | 75                                |
| Д16Т, лист горячекатаный                  | 350                  | 0,1     | 70                                |
| То же                                     | 370                  | 0,4     | 85                                |
| Д16Т1, лист холоднокатаный                | 420                  | 0,1     | 55                                |
| Д16чТ, то же                              | 300                  | 0,2     | 65                                |
| Д16чТ, лист горячекатаный                 | 300                  | 0,2     | 80                                |
| То же                                     | 360                  | 0,2     | 75                                |
| Д16чТ, плита                              | 350                  | 0,2     | 73                                |
| Д16чТ, панель прессованная                | 420                  | 0,2     | 83                                |
| АК4-1Т1, плита                            | 380                  | 0,2     | 52                                |
| То же                                     | 400                  | 0,2     | 45                                |
| 1201Т1, лист холоднокатаный               | 380                  | 0,2     | 50                                |
| 1201Т1, лист горячекатаный                | 330                  | 0,2     | 63                                |
| То же                                     | 330                  | 0,3     | 75                                |
| »                                         | 330                  | 0,4     | 82                                |
| 1201Т1, плита                             | 365                  | 0,2     | 73                                |
| В95Т1, лист горячекатаный                 | 480                  | 0,1     | 52                                |
| То же                                     | 540                  | 0,1     | 40                                |
| В95пчТ1, лист горячекатаный               | 530                  | 0,1     | 60                                |
| В95пчТ2, лист холоднокатаный              | 475                  | 0,2     | 60                                |
| В95пчТ2, лист горячекатаный               | 460                  | 0,2     | 73                                |
| То же                                     | 480                  | 0,1     | 63                                |

\* Образцы ДП.



| Сплав, состояние, полу-<br>фабрикат | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $B$ , м | $K_{IC}$ ,<br>МПа·м <sup>1/2</sup> |
|-------------------------------------|----------------------|---------|------------------------------------|
| В95пчТ2, лист горячека-<br>танный   | 480                  | 0,2     | 80                                 |
| В95пчТ2, плита                      | 465                  | 0,2     | 80                                 |
| В95пчТ2, панель прессо-<br>ванная   | 480                  | 0,2     | 85                                 |
| Титановые сплавы [21, 27, 28]       |                      |         |                                    |
| ОТ4, лист, отжиг                    | 660                  | 0,1     | 140                                |
| ВТ5-1, то же                        | 800                  | 0,1     | 100                                |
| ВТ14, лист, отжиг                   | 950                  | 0,1     | 88                                 |
| ВТ14, лист, закалка<br>и старение   | 1175                 | 0,1     | 62                                 |
| ВТ20, лист, отжиг                   | 950                  | 0,1     | 115                                |
| ВТ6, лист, закалка<br>и старение    | 1050                 | 0,1     | 71—85                              |

Таблица 3.56. Влияние низких температур на вязкость разрушения при плоской деформации некоторых сталей и сплавов [22, 25—27]

| Сталь, сплав                   | $\sigma_{0,2}$ ,<br>МПа | $K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup> , при $t$ , °C |     |      |      |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|-----|------|------|
|                                |                         | 20                                             | —70 | —130 | —196 |
| Сталь 20                       | 285                     | —                                              | —   | 47   | 22   |
| 25Г2НМ                         | 350                     | 175                                            | 50  | 40   | —    |
| 15Х2НМФА                       | 640                     | 148                                            | 83  | 68   | —    |
| 30ХГСНА                        | 1550                    | 85                                             | 45  | —    | —    |
| 03Х18К8Н5Т                     | 1550                    | 130                                            | 130 | 120  | —    |
| 03Х18К9М5Т                     | 1700                    | 100                                            | 79  | 63   | 47   |
| 03Х18К9М5Т                     | 2000                    | 70                                             | 70  | —    | —    |
| ВТ6ч, плита                    | 820                     | 85                                             | —   | —    | 60   |
| Д16Т, прессо-<br>ванная полоса | 340                     | 37                                             | —   | —    | 55   |
| Д16Т, то же                    | 350                     | 31                                             | —   | —    | 35,5 |
| 1201Т1, плита*                 | 350                     | 35                                             | —   | —    | 35   |
| АК4-1Т1, »                     | 330                     | 31                                             | —   | —    | 36   |
| АК4-1Т1, »                     | 405                     | 27                                             | —   | —    | 30   |
| В95Т1, »                       | 495                     | 28                                             | —   | —    | 29   |

\* При температуре —253 °C  $K_{IC} = 40$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

Таблица 3.57. Скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах [5, 20, 27, 27]\*

| Сплав, состояние,<br>полуфабрикат | $\sigma_{0,2}$ ,<br>МПа | $dl/dN \cdot 10^6$ , м/цикл, при $\Delta K$ ,<br>МПа·м <sup>1/2</sup> |      |      |      |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                   |                         | 12,4                                                                  | 15,5 | 18,6 | 21,7 |
| Д16Т, лист                        | 325                     | 0,37                                                                  | 0,6  | 1,0  | —    |
| Д16чТ, »                          | 350                     | 0,2                                                                   | 0,35 | 0,5  | 0,9  |
| Д16Т1, »                          | 470                     | 0,35                                                                  | 0,55 | 1,0  | 1,7  |
| Д16чТ1, »                         | 480                     | 0,35                                                                  | 0,5  | 0,9  | 1,5  |
| Д19Т, »                           | 345                     | 0,3                                                                   | 0,5  | 0,65 | 1,3  |
| Д19Т1, »                          | 450                     | 0,35                                                                  | 0,75 | 1,7  | 3    |

\* Образец — пластина шириной 100—200 мм с центральной щелью, испытание при асимметричном растяжении.

| Сплав, состояние,<br>полуфабрикат | $\sigma_{0,2}$ ,<br>МПа | $dl/dN \cdot 10^6$ , м/цикл, при $\Delta K$ ,<br>МПа·м <sup>1/2</sup> |      |      |      |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                   |                         | 12,4                                                                  | 15,5 | 18,6 | 21,7 |
| 1911Т1, лист                      | 355                     | 0,4                                                                   | 0,8  | 1,5  | 2    |
| В95Т1, »                          | 500                     | 0,5                                                                   | 0,8  | 1,3  | 1,6  |
| В95пчТ1, »                        | 530                     | 0,3                                                                   | 0,65 | 1,0  | 1,2  |
| В95пчТ2, »                        | 480                     | 0,4                                                                   | 0,7  | 0,9  | —    |
| АМг6М, »                          | 170                     | 1,5                                                                   | 2,5  | —    | —    |
| АК4-1Т1, плита                    | 450                     | 0,4                                                                   | 0,75 | 1,5  | 2,2  |
| 1201Т1, »                         | 345                     | 0,3                                                                   | 0,5  | 1,1  | 1,4  |
| В95пчТ1, »                        | 500                     | 0,65                                                                  | 1,25 | 1,95 | —    |
| В95пчТ2, »                        | 460                     | 0,5                                                                   | 0,8  | 1,15 | —    |
| Д16чТ, »                          | 350                     | 0,2                                                                   | 0,4  | 0,75 | —    |
| Д16чТ1, »                         | 470                     | —                                                                     | 0,6  | —    | —    |
| Д16чТ, штамповка                  | 325                     | 0,3                                                                   | —    | 0,7  | —    |
| АК6Т1, »                          | 350                     | 0,4                                                                   | —    | 0,85 | —    |
| В93пчТ2, Т3 »                     | 360—<br>440             | 0,25                                                                  | —    | 0,55 | —    |
| Д16чТ, прессованная<br>панель     | 400                     | 0,2                                                                   | 0,4  | 0,45 | 0,6  |
| Д19Т, то же                       | 345                     | 0,25                                                                  | 0,45 | 0,75 | 1,3  |
| В95Т1, прессованная<br>полоса     | 560                     | 0,5                                                                   | 0,8  | 1,0  | 1,3  |
| В95пчТ1, прессованная<br>панель   | 560                     | 0,4                                                                   | 0,65 | 1,05 | —    |
| В95пчТ2, то же                    | 470                     | 0,3                                                                   | 0,5  | 0,95 | —    |
| В95пчТ3, »                        | 430                     | 0,25                                                                  | 0,4  | 0,9  | —    |

Таблица 3.58. Скорость роста трещины усталости в титановых сплавах и сталях [21, 26, 27, 28]

| Сплав, сталь, состояние,<br>полуфабрикат | $\sigma_{0,2}$ ,<br>МПа | $dl/dN$ , $10^6$ , м/цикл, при $\Delta K$ ,<br>МПа·м <sup>1/2</sup> |      |      |      |      |
|------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
|                                          |                         | 15,5                                                                | 25,4 | 31   | 46,6 | 54,4 |
| ОТ4-1, отжиг, лист                       | 570                     | —                                                                   | —    | 0,45 | 1,05 | 1,8  |
| ОТ4, то же                               | 660                     | —                                                                   | —    | 0,7  | 2    | —    |
| ВТ20, »                                  | 950                     | —                                                                   | —    | 0,5  | 1,2  | 1,8  |
| ВТ23, закалка и ста-<br>рение, лист      | 1150                    | —                                                                   | —    | 0,7  | 3    | —    |
| ВТ6ч, отжиг, плита*                      | 850                     | 0,16                                                                | 0,5  | 1    | 1,9  | 2,6  |
| ВТ6ч, закалка и ста-<br>рение, плита*    | 1000                    | 0,15                                                                | 0,6  | 0,9  | 1,1  | 2,3  |
| ВТ22, отжиг, плита*                      | 1100                    | 0,15                                                                | 0,4  | 0,9  | 1,8  | —    |
| ВТ23, старение, пли-<br>та*              | 1100                    | 0,15                                                                | 0,5  | 0,8  | 1,5  | —    |
| ВТ23, закалка и ста-<br>рение, поковка*  | 1050                    | 0,22                                                                | 0,8  | —    | 2    | —    |
| ВТ22, отжиг, штам-<br>повка              | 1000                    | —                                                                   | —    | —    | —    | 2    |
| ВТ23, отжиг, плита                       | 1000                    | —                                                                   | —    | —    | —    | 2,5  |
| 30ХГСНА, изотерми-<br>ческая закалка     | 1550                    | —                                                                   | —    | —    | —    | 0,65 |
| 03Н18К8М5Т, закал-<br>ка и старение      | 1550                    | —                                                                   | —    | —    | —    | 0,55 |
| Ст3                                      | 265                     | —                                                                   | 1,5  | —    | —    | —    |
| 18Г                                      | 240                     | —                                                                   | 1,4  | —    | —    | —    |
| 09Г2С                                    | 360                     | —                                                                   | 1,3  | —    | —    | —    |

\* Внецентренное растяжение компактных образцов.

Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии  $K_{IC}^y$  определяется, как правило, при растяжении широких, относительно тонких пластин с центральной щелью (ширина  $B=100\div 400$  мм;  $t=2\div 15$  мм). Длина щели вместе с выращенными по ее концам трещинами составляет примерно 0,3  $B$ . При определении  $K_{IC}^y$  в расчет принимается начальный размер трещины (вместе со щелью).

Скорость роста трещины усталости определяют на пластинах с центральной щелью размером  $2l=6\div 10$  мм при циклическом растяжении. Графическое дифференцирование кривой «прирост трещины  $\Delta 2l$  — число циклов  $N$ » позволяет получить скорость роста трещины усталости  $dl/dN$  в зависимости от размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K=\Delta\sigma\sqrt{\pi l}$   $y$ , где  $\Delta\sigma=\sigma_{\max}\div\sigma_{\min}$  — размах напряжений цикла.

Значения характеристик разрушения зависят от уровня прочности и структуры сплава, геометрии образца и трещины, а также условий нагружения. Представленные в табл. 3.54—3.58 данные получены на образцах со сквозной трещиной. Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии  $K_{IC}^y$  существенно зависит от геометрии образца, в частности от ширины пластины. Ориентировочно значение величины  $K_{IC}^y$  пропорционально  $\sqrt{B}$  ( $B$  — ширина пластины), однако оно возрастает с увеличением ширины пластины не строго пропорционально  $\sqrt{B}$ , а в меньшей степени.

Для некоторых групп материалов установлены корреляционные связи между значениями вязкости разрушения при плоской деформации  $K_{IC}$  и удельной работы образца с трещиной КСТ при ударном и статическом изгибе [5, 21].

### 3.6. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В табл. 3.59—3.62 приведены: временное сопротивление разрыву  $\sigma_{br}$ , предел текучести  $\sigma_T$ , твердость материала по Виккерсу HV, модуль Юнга  $E$ , модуль сдвига  $G$ , объемный модуль  $B$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ , температура кристаллизации при отжиге из аморфного состояния  $T_K$ . В примечании для некоторых сплавов указаны их общепринятые названия.

Модули упругости аморфных металлов связаны соотношениями

$$B = \frac{E}{3(1-2\mu)} = \frac{EG}{3(3G-E)}.$$

Данные в таблицах, если не оговорено особо, приведены для температуры 20 °С, для сравнения указаны механические свойства некоторых металлов в поликристаллическом или жидком состоянии.

Аморфные сплавы (АС) получают сверхскоростной закалкой из расплава со скоростью  $10^5\text{—}10^7$  К/с. АС можно рассматривать как идеальный упругопластичный материал с исчезающе малым деформационным упрочнением. В зависимости от температуры в АС наблюдаются два типа пластического течения. При температурах ниже  $T_p=0,7\div 0,8 T_K$  имеет место высокая локальная пластичность при макроскопически хрупком характере разрушения. Скольжение происходит в локализованных полосах деформации (гетерогенная деформация). При температурах выше  $T_p$  пластическая деформация однородна и осуществляется путем вязкого течения (гомогенная деформация).

Таблица 3.59. Упругие свойства аморфных бинарных сплавов [33—39, 41]

| Материал (состав, %)                         | $\sigma_{br}$ , ГПа | $\sigma_T$ , ГПа | HV, ГПа | $E$ , ГПа | $G$ , ГПа | $B$ , ГПа | $\mu$ | $T_K$ , К |
|----------------------------------------------|---------------------|------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Mg <sub>70</sub> Zn <sub>30</sub>            | —                   | —                | —       | 35        | —         | —         | —     | 358,6     |
| Mg (полукристаллический)                     | —                   | —                | —       | 45        | 17,5      | 34        | 0,28  | —         |
| Fe <sub>88</sub> B <sub>12</sub>             | —                   | —                | —       | 137       | —         | —         | —     | —         |
| Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>             | —                   | 3,63             | 10,8    | 168       | 64,9      | 141       | 0,3   | —         |
| Fe <sub>75</sub> B <sub>25</sub>             | —                   | —                | 12,89   | 175,5     | —         | —         | 0,32  | —         |
| Fe <sub>100-x</sub> P <sub>x</sub> (14≤x≤21) | —                   | —                | —       | 120—130   | —         | —         | —     | —         |
| Fe (полукристаллический)                     | —                   | —                | —       | 211       | 82,4      | —         | 0,28  | —         |
| Fe («усы»)                                   | —                   | 12               | —       | —         | 79,2      | —         | —     | —         |
| Co <sub>75</sub> B <sub>25</sub>             | —                   | —                | 11,3    | 176,5     | —         | —         | 0,34  | —         |
| Co <sub>85</sub> P <sub>15</sub>             | —                   | —                | —       | 120       | 39        | —         | —     | —         |
| Co <sub>17</sub> Sm <sub>2</sub>             | —                   | —                | —       | —         | 42,6      | 133       | —     | —         |
| Ni <sub>80</sub> P <sub>20</sub>             | —                   | —                | —       | 103       | 36,7      | 161       | 0,394 | —         |
| Cu <sub>50</sub> Ti <sub>50</sub>            | —                   | —                | —       | 96,7      | —         | —         | —     | —         |
| Cu <sub>80</sub> Zr <sub>40</sub>            | 1,96                | —                | 5,3     | 74,5      | —         | —         | —     | 753       |
| Cu <sub>57</sub> Zr <sub>43</sub>            | 1,96                | —                | 5,3     | 74,5      | —         | —         | —     | —         |
| Cu <sub>50</sub> Zr <sub>50</sub>            | —                   | —                | 5,69    | 85,3      | —         | —         | 0,36  | —         |
| Cu <sub>50</sub> Ti <sub>50</sub>            | —                   | —                | 5,98    | 96,7      | —         | —         | 0,36  | —         |
| Cu (полукристаллический)                     | —                   | —                | —       | 123       | 45,5      | 136       | 0,35  | —         |
| Pd <sub>80</sub> Si <sub>20</sub>            | 1,33                | 0,86             | 3,19    | 66,7      | 35,5      | 182       | 0,416 | 653       |
| Pd (полукристаллический)                     | —                   | —                | —       | 123       | 44,1      | 139       | 0,30  | —         |
| Pt <sub>75</sub> P <sub>25</sub>             | —                   | —                | 3,37    | 91,2      | —         | —         | 0,43  | —         |

\* Meiglas 2605.

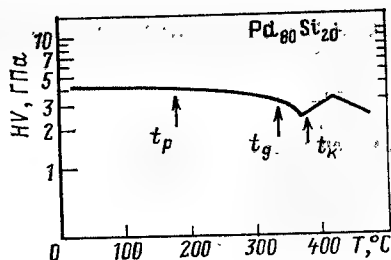


Рис. 3.25. Температурная зависимость твердости HV аморфного сплава  $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$ ;  $t_g$  — температура стеклования,  $t_k$  — температура кристаллизации [34]

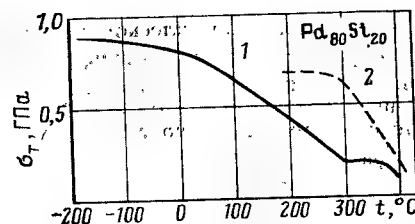


Рис. 3.26. Температурная зависимость предела текучести аморфной фазы  $\text{Pd}_{80}\text{Si}_{20}$  (1) и кристаллической орторомбической фазы  $\text{Pd}_3\text{Si}$  (2) [36]

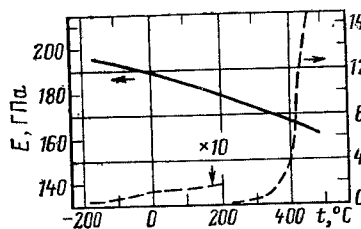


Рис. 3.27. Температурная зависимость модуля Юнга  $E$  и коэффициента поглощения ультразвука  $Q^{-1}$  для аморфного сплава  $\text{Co}_{70.4}\text{Fe}_{4.6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ . Измерения проводились при частоте звука 140 Гц. Экспоненциальный рост внутреннего трения ( $Q^{-1}$ ) при приближении к температуре стеклования (здесь — около  $500^\circ\text{C}$ ) характерен для всех аморфных материалов [33]

Таблица 3.60. Упругие свойства аморфных многокомпонентных сплавов [33—42]

| Материал (состав, %)                                                | $\sigma_{\text{вр}}, \text{ ГПа}$ | $\sigma_{\text{т}}, \text{ ГПа}$ | HV, ГПа | $E, \text{ ГПа}$ | $G, \text{ ГПа}$ | $B, \text{ ГПа}$ | $\mu$ | $T_{\text{г}}, \text{ К}$ | Примечание    |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------|------------------|------------------|------------------|-------|---------------------------|---------------|
| $\text{Ti}_{50}\text{Be}_{40}\text{Zr}_{10}$                        | 1,86                              | —                                | 7,16    | 105              | —                | —                | —     | 773                       | Metglas 2204  |
| $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{10}\text{B}_{12}$                         | 3,33                              | —                                | 8,92    | 125,5            | —                | —                | —     | 693                       | Amomet 26     |
| $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$                             | 3,04                              | —                                | 7,45    | 121,6            | —                | —                | —     | —                         | Metglas 2615  |
| $\text{Fe}_{80}\text{P}_{14}\text{C}_4\text{B}_1$                   | —                                 | 2,44                             | 8,19    | 135,3            | —                | —                | —     | —                         | —             |
| $\text{Fe}_{60}\text{Cr}_6\text{Mo}_6\text{B}_{28}$                 | —                                 | 4,5                              | —       | —                | —                | —                | —     | —                         | —             |
| $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$                         | —                                 | —                                | —       | 174,2            | 65,0             | 184              | 0,34  | —                         | —             |
| $\text{Fe}_{60}\text{Ni}_{20}\text{B}_{20}$                         | —                                 | —                                | —       | 166              | 61,0             | 206              | 0,365 | —                         | —             |
| $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$                         | 2,4                               | —                                | —       | 159,7            | 59,6             | 167              | 0,341 | —                         | Vitrovac 0040 |
| $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$               | 1,72                              | 2,4                              | 6,3—7,4 | 126—144          | —                | —                | —     | —                         | Metglas 2826  |
| $\text{Fe}_{22}\text{Ni}_{36}\text{Cr}_{14}\text{P}_{13}\text{B}_6$ | 1,91                              | —                                | 7,35    | 144              | —                | —                | —     | —                         | Metglas 2826A |
| $\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{49}\text{P}_{14}\text{B}_6\text{Si}_2$    | —                                 | 2,38                             | 7,77    | 132              | 48,0             | 169              | 0,37  | —                         | Metglas 2826B |
| $\text{Fe}_{82}\text{Zr}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 8,29    | —                | —                | —                | —     | 868                       | —             |
| $\text{Fe}_{82}\text{Nb}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 7,75    | —                | —                | —                | —     | 820                       | —             |
| $\text{Fe}_{82}\text{Mo}_{12}\text{B}_{20}$                         | 2,60                              | —                                | 9,95    | 144              | —                | —                | —     | 885                       | —             |
| $\text{Fe}_{82}\text{Hf}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 9,02    | —                | —                | —                | —     | 763                       | Amomet 27     |
| $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$                         | 2,94                              | —                                | 8,92    | 104              | —                | —                | —     | 833                       | —             |
| $\text{Co}_{82}\text{Ti}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 8,73    | —                | —                | —                | —     | —                         | —             |
| $\text{Co}_{74}\text{Fe}_6\text{B}_{20}$                            | —                                 | —                                | —       | 175              | 66,7             | 132              | 0,32  | 648                       | —             |
| $\text{Co}_{82}\text{Zr}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 8,34    | —                | —                | —                | —     | 705                       | —             |
| $\text{Co}_{82}\text{Nb}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 6,77    | —                | —                | —                | —     | 820                       | —             |
| $\text{Co}_{82}\text{Hf}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 9,17    | —                | —                | —                | —     | 723                       | —             |
| $\text{Co}_{82}\text{Ta}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 7,50    | —                | —                | —                | —     | 733                       | Amomet 28     |
| $\text{Co}_{82}\text{Ta}_{12}\text{B}_6$                            | 2,65                              | —                                | 8,43    | 103              | —                | —                | —     | —                         | Vitrovac 0080 |
| $\text{Ni}_{75}\text{Si}_8\text{B}_{17}$                            | 1,85                              | —                                | —       | —                | —                | —                | —     | 703                       | —             |
| $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$                            | —                                 | —                                | 6,62    | —                | —                | —                | —     | 725                       | —             |
| $\text{Ni}_{82}\text{Zr}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 6,18    | —                | —                | —                | —     | 653                       | —             |
| $\text{Ni}_{82}\text{Hf}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 5,74    | —                | —                | —                | —     | —                         | —             |
| $\text{Ni}_{82}\text{Ta}_{12}\text{B}_6$                            | —                                 | —                                | 5,31    | 104              | —                | —                | 0,40  | —                         | —             |
| $\text{Ni}_{64}\text{Pd}_{16}\text{P}_{20}$                         | 1,77                              | —                                | 4,46    | 82,5             | 34,8             | 182              | —     | —                         | —             |
| $\text{Pd}_{77.5}\text{Cu}_6\text{Si}_{16.5}$                       | —                                 | 1,47                             | 4,43    | 92,2             | —                | —                | 0,41  | —                         | —             |
| $\text{Pd}_{64}\text{Ni}_{16}\text{P}_{20}$                         | 1,57                              | —                                | —       | 98,1             | —                | —                | —     | —                         | —             |
| $\text{Pd}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{20}$                         | —                                 | —                                | —       | 96,1             | 33,8             | 202              | 0,421 | —                         | —             |
| $\text{Pt}_{60}\text{Ni}_{15}\text{P}_{25}$                         | —                                 | —                                | —       | —                | —                | —                | —     | —                         | —             |

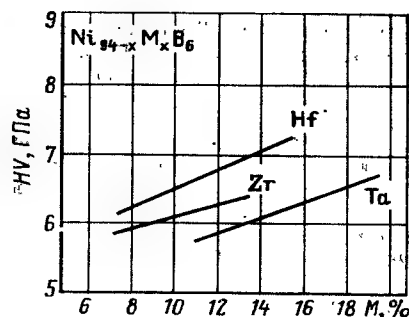
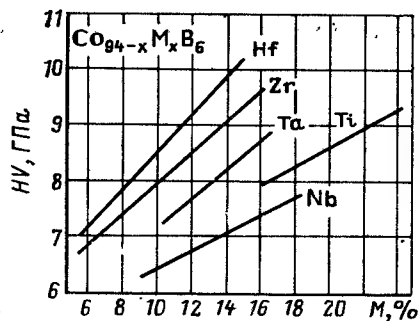
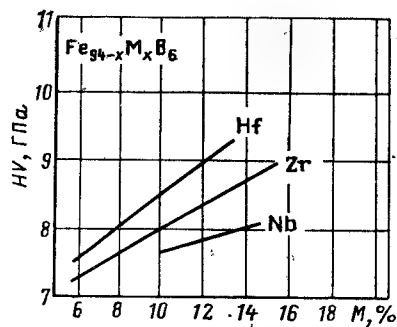


Рис. 3.28. Зависимость твердости  $HV$  аморфных сплавов  $Fe_{94-x}M_xB_6$ ,  $Co_{94-x}M_xB_6$  и  $Ni_{94-x}M_xB_6$  где  $M=Ti, Zr, Rf, Nb$  и  $Ta$ , от массового содержания компонента  $M$  [40]

Таблица 3.61. Значения объемных модулей аморфных ( $B_a$ ) и жидких ( $B$ ) металлов, их соотношений со значениями в жидкой фазе и скачка объема при кристаллизации ( $\Delta V/V$ ) [33]

| Материал (состав, %)         | $B_a$ , ГПа | $B/B_a$ | $\Delta V/V$ , % |
|------------------------------|-------------|---------|------------------|
| $Pd_{80}Si_{20}$             | 182         | 1,062   | —                |
| $Pd_{77,5}Cu_{16,5}Si_{6,5}$ | 182         | 1,065   | 1,6              |
| $Co_{17}Sm_{83}$             | 133         | 1,045   | 1,6              |
| Na (жидкий при $T_m$ )       | 54          | 1,08    | 2,5              |
| Cs (жидкий при $T_m$ )       | 16          | 1,13    | 2,6              |

Таблица 3.62. Значения модуля Юнга  $E_a$  и сдвиговых модулей  $G_a$  аморфных сплавов и модулей  $E_c$  и  $G_c$  кристаллизованных сплавов [33]

| Материал (состав, %)                      | $E_a$ , ГПа | $E_c/E_a$ | $G_a$ , ГПа | $G_c/G_a$ |
|-------------------------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| $Pd_{80}Si_{20}$                          | —           | —         | 35,5        | 1,34      |
| $Pd_{81}Si_{19}$                          | 80          | 1,26      | —           | —         |
| $Co_{89,5}Sm_{10,5}$                      | —           | —         | 42,6        | 1,36      |
| $Co_{86}P_{15}$                           | —           | —         | 39          | 1,34      |
| $Co_{80}P_{20}$                           | 105         | 1,23      | —           | —         |
| $Fe_{80}B_{20}$                           | 168         | 1,24      | 64,9        | 1,35      |
| $Ni_{76}P_{24}$ (закаленный)              | 95          | 1,32      | 33,5        | 1,46      |
| $Pd_{77,5}Cu_{16,5}Si_{6,5}$ (отожженные) | 94          | 1,24      | 34,8        | 1,35      |
| $SiO_2$                                   | —           | —         | 31          | 1,38      |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Металловедение и термическая обработка стали:** Справочник. Т. 1. — 2-е изд. М.: Изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961.
2. **Механические свойства редких металлов:** Под ред. Л. Д. Соколова. М.: Металлургия, 1972.
3. **Конструкционные материалы:** В 3-х томах/Под ред. А. Т. Туманова, М.: Советская энциклопедия, 1965.
4. **Буркхардт А.** Механические и технологические свойства чистых металлов: Пер. с нем./Под ред. Я. П. Селиского. М.—Л.: Металлургиздат, 1941.

5. **Промышленные алюминиевые сплавы:** Справочник/Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. — 2-е изд. М.: Металлургия, 1984.

6. **Савицкий Е. М., Бурханов Г. С.** Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов. — 2-е изд. М.: Наука, 1971.

7. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов: В 2-х частях: — 3-е изд. М.: Машиностроение, 1974.

8. **Благородные металлы:** Справочник/Под ред. Е. М. Савицкого. М.: Металлургия, 1984.

9. **Потак Я. М.** Высокопрочные стали. Сер. Успехи современного металловедения. М.: Металлургия, 1972.

10. **Титановые сплавы в машиностроении.** М.: Машиностроение, 1977.

11. **Савицкий Е. М.** Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

12. **Гуляев Г. М.** Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981.

13. **Заболоцкий А. А.** Производство и применение композиционных материалов. Итоги науки и техники. Сер. Композиционные материалы. М.: ВИНТИ АН СССР, 1976.

14. **Структура и свойства композиционных материалов/К. И. Портной, С. Е. Салибеков, И. Л. Светлов, В. М. Чубаров.** М.: Машиностроение, 1979.

15. **Современные композиционные материалы:** Пер. с англ./Под ред. И. Л. Светлова. М.: Мир, 1970.

16. **Минералы и горные породы СССР/Т. Б. Здорик, В. В. Матлас, И. Н. Тимофеев, Л. Г. Фельдман.** М.: Мысль, 1970.

17. **Лебедев С. И.** Определение микротвердости минералов. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

18. **Алюминиевые сплавы:** Справочник/Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979.

19. **Кошелев П. Ф.** Механические свойства сплавов для криогенной техники. М.: Машиностроение, 1971.

20. **Кишкина С. И.** Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1981.

21. **Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Новосильцев Н. И.** Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983.

22. **Кудряшов В. Г., Смоленцев В. И.** Вязкость разрушения алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1976.

23. **Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов:** Справочное пособие: В 3-х томах. Т. 2/Под ред. С. И. Кишкиной и Н. М. Склярова. М.: Машиностроение, 1974.

24. **Справочник металлста:** В 5 томах. Т. 2/Под ред. А. Г. Рахштадта, В. А. Брострема. М.: Машиностроение, 1976.

25. **Романив О. Н.** Вязкость разрушения конструк-

ционных сталей. Сер. Достижения отечественного металлургии. М.: Металлургия, 1979.

26. **Сопротивление** развитию усталостных трещин в металлических сплавах, применяемых в железнодорожном транспорте: Сборник научных трудов/Под ред. Н. А. Буше, М. Н. Георгиева М.: Транспорт, 1984.

27. **Циклическая трещиностойкость** металлических материалов и элементов конструкций транспортных средств и сооружений: Сборник научных трудов/Под ред. В. Н. Данилова, Н. Я. Межовой. М.: Транспорт, 1984.

28. **Микляев П. Г., Нешпор Г. С., Кудряшов В. Г.** Кинетика разрушения. М.: Металлургия, 1979.

29. **Степинов М. Н., Гиацинтов Е. В.** Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973.

30. **Марин Н. И.** Статическая выносливость элементов авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1968.

31. **Ратнер С. И.** Разрушение при повторных нагрузках. М.: Оборонгиз, 1959.

32. **Серенсен С. В., Кобаев В. П., Шнейдерович Р. М.** Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975.

33. **Künzi H.-U.** In: Glassy Metals II, ed. H.-J. Güntherodt, H. Beck. Topics in Applied Physics. Vol. 52. N. Y.: Springer, Berlin, Heidelberg, 1982.

34. **Masumoto T.** — Sci. Rep. RITU. 1977. Vol. A26. P. 246.

35. **Tonizawa S., Masumoto T.** — Sci. Rep. RITU. 1977. Vol. A26. P. 263.

36. **Masumoto T., Maddin R.** — Acta Metallurgica. 1971. Vol. 19. P. 725.

37. **Davis L. A., Ray R., Ohou C.-P., O'Handley R. C.** — Scripta Metallurgica. 1976. Vol. 10. P. 541.

38. **Chen H. S.** — Rept. Progr. Phys. 1980. Vol. 43. P. 353.

39. **Gilman J. J.** — J. Phys. et radium (Paris). 1980. Vol. 41. C. 8. P. 811.

40. **Inoue A., Kobayashi K., Nose M., Masumoto T.** — Ibid. 1980. Vol. 41. C. 8. P. 831.

41. **Ishio S., Sato Y., Ikeda T., Takahashi M.** // J. Non-Crystalline Sol. 1984. Vol. 61, 62, P. 955.

42. **Bengus V. Z., Tabachnikova E. D., Startsev V. I.** — Phys. Stat. Sol. (a). 1984. Vol. 81. P. K11.

## ГЛАВА 4 СЖИМАЕМОСТЬ

Б. В. Виноградов

### 4.1. ВВЕДЕНИЕ

Сжимаемость, или объемная упругость, есть обратное уменьшение объема вещества под действием всестороннего давления. Количественно сжимаемость характеризуется величиной  $k$ , Па<sup>-1</sup>,

$$k = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right) = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right), \quad (4.1)$$

где  $V$  — объем, м<sup>3</sup>;  $p$  — давление, Па;  $\rho$  — плотность, кг·м<sup>-3</sup>. Употребляются также термины — коэффициент сжимаемости, несжимаемость, коэффициент несжимаемости. Величина, обратная сжимаемости, называется модулем объемной упругости  $K$ , Па,  $K=1/k$  (модуль всестороннего сжатия, модуль сжимаемости, модуль несжимаемости).

Различают изотермическую  $k_T$  и адиабатическую  $k_S$  сжимаемости, которые связаны между собой соотношением [1]

$$k_T = \frac{c_p}{c_v} k_S = k_S + \frac{T\alpha^2}{c_p\rho}, \quad (4.2)$$

где  $c_p$  и  $c_v$  — удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме, Дж·кг<sup>-1</sup>·град<sup>-1</sup>;  $T$  — температура, К;  $\alpha$  — объемный коэффициент теплового расширения, К<sup>-1</sup>. Для твердых тел при комнатной температуре различие между  $k_T$  и  $k_S$  обычно не превосходит нескольких процентов. (В табл. 4.1, 4.2 адиабатическая сжимаемость отмечена индексом  $S$ , изотермическая — индексом  $T$ .)

Для анизотропных твердых тел относительное изменение размеров под давлением зависит от направления и в кристаллах характеризуется линейной сжимаемостью в направлении главных осей:

$$k_a = -\frac{1}{a} \left( \frac{\partial a}{\partial p} \right); \quad k_b = -\frac{1}{b} \left( \frac{\partial b}{\partial p} \right); \quad k_c = -\frac{1}{c} \left( \frac{\partial c}{\partial p} \right). \quad (4.3)$$

Сжимаемость связана с упругими постоянными  $s_{ij}$ :

$$k = \sum_{i,j=1}^3 s_{ij} = s_{11} + s_{22} + s_{33} + 2(s_{23} + s_{13} + s_{12}). \quad (4.4)$$

Для изотропных твердых тел

$$1/k = K = E/3(1 - 2\sigma), \quad (4.5)$$

где  $E$  — модуль Юнга, Па;  $\sigma$  — коэффициент Пуассона. Сжимаемость зависит от давления и температуры. Экспериментальные результаты зависимости объема твердых тел от давления представлены в табл. 4.1—4.4 в виде

$$(V - V_0)/V_0 = -ap + bp^2 - cp^3. \quad (4.6)$$

Для некоторых данных приведена погрешность эксперимента (в круглых скобках, по последним значащим цифрам). В этом случае сжимаемость при давлении  $p$  определяется по формуле

$$k = (a - 2bp + 3cp^2)/(1 - ap + bp^2 - cp^3), \quad (4.7)$$

начальная сжимаемость  $k_0 = k(p \simeq 0) = a$ . Часть результатов представлена в виде параметров уравнения Мурнана [2]

$$p = \frac{K}{K'} \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^{K'} - 1 \right] \quad (4.8)$$

или его модификации [3]

$$p = \frac{3K}{2} \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{7}{3}} - \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{5}{3}} \right] \times \left\{ 1 - \xi \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right] \right\}, \quad (4.9)$$

где  $K' = \partial K / \partial p$  — производная модуля объемной упругости по давлению;  $\xi$  — безразмерный параметр.

Для идеального газа  $v=RT/p$  и  $k=1/p$ , где  $v$  — объем,  $\text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ ;  $T$  — температура, К. Свойства реальных газов и жидкостей описываются более сложными  $p$ — $v$ -соотношениями [4], например уравнением Тэйтэ

$$v = v_0 \left( 1 - C \ln \frac{B + p}{B + p_0} \right) \quad (4.10)$$

или логарифмическим уравнением

$$v = \frac{A}{\lg(p/p_0) - A/v_0} \quad (4.11)$$

В табл. 4.6, 4.9 приведены параметры уравнения Тэйтэ для ряда жидкостей и плотных газов. В этом случае сжимаемость  $k$  определяется выражением

$$k(p) = C/(B + p) \left( 1 - C \ln \frac{B + p}{B + p_0} \right) \quad (4.12)$$

Часто  $p$ — $v$ — $T$ -свойства газов и жидкостей характеризуют безразмерной величиной  $Z = pv/RT$ , которая называется фактором сжимаемости. На рис. 4.1 показаны  $p$ — $v$ — $T$ -соотношения в жидкостях и газах в виде семейства кривых  $Z = Z(T_r, p_r)$ , где  $T_r = T/T_c$ ;  $p_r = p/p_c$ ;  $T_c$  и  $p_c$  — приведенные температура и давление;  $T_c$  и  $p_c$  — критические температура и давление. В широкой области давлений и температур значения  $Z$ , приведенные на рис. 4.1, отличаются от экспериментальных не более чем на 4—6 % для большинства веществ (кроме сильно поляризуемых) [5].

Сжимаемости чистых жидкостей и газов, а также смесей можно рассчитать по данным [5]. Информация о сжимаемости и модулях всестороннего сжатия твердых тел и жидкостей содержится в [6]. Данные о сжимаемости и модулях всестороннего сжатия твердых тел содержатся в [7—10].

## 4.2. СЖИМАЕМОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ (табл. 4.1—4.6)

Таблица 4.1. Сжимаемость и модуль объемного сжатия элементов. Если не указаны  $p$  и  $T$ , данные относятся к атмосферному давлению и комнатной температуре [буквами  $T$  и  $S$  отмечены изотермическая и адиабатическая сжимаемости,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты уравнения (4.6)]

| Элемент                      | $a$ , $10^{-12}$ Па $^{-1}$ | $b$ , $10^{-22}$ Па $^{-2}$ | $c$ , $10^{-30}$ Па $^{-3}$ | $K$ , $10^9$ Па | $K'$     | Литература |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|----------|------------|
| Азот (65 К)*                 | 801                         | —                           | —                           | —               | —        | [7]        |
| Алюминий ( $T$ )             | 12,676                      | 3,347                       | —                           | 78,877          | 3,165    | [11]       |
| Аргон (4 К) ( $T$ )          | —                           | —                           | —                           | 2,86            | 7,2      | [13]       |
| Барий ( $T$ )                | 105,69                      | 152,21                      | 1,124                       | 9,462           | 1,725    | [11]       |
| Бериллий                     | 9,97                        | —                           | —                           | —               | —        | [12]       |
| Бор                          | 5,58                        | 0,8                         | —                           | —               | —        | [7]        |
| Ванадий ( $T$ )              | 7,011                       | 3,245                       | —                           | 139,42          | 18,24    | [14]       |
| Висмут ( $T$ )               | 32,286                      | 26,529                      | —                           | 30,973          | 4,09     | [11]       |
| Водород (4 К)*               | 5000                        | —                           | —                           | —               | —        | [7]        |
| $n$ -Водород (4,2 К) ( $T$ ) | —                           | —                           | —                           | 0,170 (6)       | 7,0 (3)  | [15]       |
| $para$ -Водород, (6—10 К)    | 5470 (180)                  | —                           | —                           | —               | —        | [16]       |
| Вольфрам ( $T$ )             | 3,475                       | 1,123                       | —                           | 300,09          | 19,10    | [14]       |
| Гадолиний ( $T$ )            | 27,271                      | 14,029                      | —                           | 35,479          | 4,77     | [14]       |
| Галлий                       | 20                          | —                           | —                           | —               | —        | [7]        |
| Гафний ( $T$ )               | 8,8745                      | —                           | —                           | 108,95          | 0,594    | [14]       |
| Германий                     | 12,93 [7]                   | 3,6 [7]                     | —                           | 75,02 (S)       | 4,55 (S) | [18]       |
| Гольмий ( $T$ )              | 25,2                        | —                           | —                           | —               | —        | [12]       |
| Диспрозий ( $T$ )            | 23,749                      | 11,259                      | —                           | 40,327          | 5,113    | [14]       |
| Европий                      | 86,62                       | 107,79                      | 1,345                       | —               | —        | [17]       |
| Железо ( $T$ )               | 5,8441                      | 1,5008                      | —                           | 171,11          | 7,789    | [11]       |
| Золото ( $T$ )               | 6,01                        | 1,36                        | —                           | 166,4           | 6,51     | [19]       |
| Индий ( $T$ )                | 25,709                      | 20,143                      | 0,125                       | 38,897          | 5,095    | [11]       |
| Иод ( $T$ )                  | 114,89                      | 337,83                      | 6,331                       | 8,37            | 6,047    | [14]       |
| Иридий ( $T$ )               | 2,82                        | —                           | —                           | —               | —        | [12]       |
| Иттербий                     | 78,1                        | 93,01                       | 1,108                       | —               | —        | [17]       |
| Иттрий ( $T$ )               | 22,251                      | 7,108                       | —                           | 44,93           | 2,2      | [14]       |
| Кадмий ( $T$ )               | 21,140                      | 11,358                      | —                           | 47,304          | 4,083    | [11]       |
| Калий ( $T$ )                | 297,13                      | 1440,4                      | 48,26                       | 3,40 (1)        | 2,99 (5) | [20]       |

| Элемент                 | $a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $b, 10^{-22} \text{ Па}^{-2}$ | $c, 10^{-30} \text{ Па}^{-3}$ | $K, 10^9 \text{ Па}$ | $K'$      | Литература |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------|------------|
| Кальций (T)             | 54,757                        | 54,206                        | 0,395                         | 18,263               | 2,616     | [11]       |
| Кобальт (T)             | 6,02                          | 2,599                         | —                             | 167,1                | 17,327    | [14]       |
| Кремний (T)             | 10,211                        | 2,96                          | —                             | 100,75               | 4,72      | [14]       |
| Криптон (77 K)*         | 560                           | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Криптон (115 K) (T)     | —                             | —                             | —                             | 1,34                 | 7,94      | [21]       |
| Ксенон (4 K)            | —                             | —                             | —                             | 3,63                 | 7,2       | [13]       |
| Лантан (T)              | 40,623                        | 31,874                        | 0,183                         | 24,617               | 2,863     | [11]       |
| Литий (T)               | 80,037                        | 100,97                        | 0,675                         | 11,8 (2)             | 3,33 (9)  | [20]       |
| Лютеций (T)             | 24,3                          | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| Магний (T)              | 28,396                        | 14,78                         | —                             | 33,561               | 4,759     | [14]       |
| Марганец (303 K)        | 8,03                          | 4,2                           | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Медь (T)                | 6,621                         | 1,099                         | —                             | 151,03               | 4,01      | [11]       |
| Молибден (T)            | 3,951                         | 1,115                         | —                             | 253,1                | 13,288    | [11]       |
| Мышьяк                  | 31,6                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Натрий (T)              | 162,4                         | 547,7                         | 15,66                         | 6,2 (1)              | 3,5 (1,0) | [20]       |
| Неодим (T)              | 29,958                        | 12,794                        | —                             | 32,552               | 3,016     | [14]       |
| Неон (4 K)*             | 1006                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Никель (T)              | 5,5475                        | 2,7045                        | —                             | 180,26               | 16,58     | [11]       |
| Ниобий (T)              | 6,778                         | 2,549                         | —                             | 144,2                | 14,5      | [14]       |
| $\alpha$ -Олово (T)     | 9,01                          | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| $\beta$ -Олово (T)      | 18,155                        | 6,123                         | —                             | 55,081               | 2,715     | [11]       |
| Палладий                | 5,34                          | 0,9                           | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Платина                 | 3,59                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Плутоний                | 19,8                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Празеодим (T)           | 33,824                        | 19,278                        | 0,132                         | 30,223               | 1,612     | [14]       |
| Рений (T)               | 2,69                          | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| Родий                   | 3,67                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| $\alpha$ -Ртуть (100 K) | 28,9                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| (200 K)                 | 34,8                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| (234 K)                 | 37,0                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| $\beta$ -Ртуть (50 K)   | 21,7                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Рубидий                 | 369,76                        | 2351,7                        | 111,3                         | 2,66 (2)             | 3,23 (2)  | [20]       |
| Рутений (T)             | 3,11                          | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| Самарий                 | 26,38                         | 10,46                         | 0,0415                        | —                    | —         | [17]       |
| Свинец (T)              | 23,611                        | 13,222                        | —                             | 42,353               | 3,744     | [11]       |
| Селен (кристалл) (T)    | 122,29                        | 394,66                        | 8,66                          | 7,90                 | 5,828     | [14]       |
| Селен (стекло)          | 173                           | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Сера (T)                | 103,5                         | 276,14                        | 4,89                          | 8,843                | 6,55      | [14]       |
| Серебро (T)             | 9,031                         | 2,317                         | —                             | 110,73               | 4,681     | [11]       |
| Скандий                 | 15,21                         | 3,083                         | 0,006                         | —                    | —         | [17]       |
| Стронций (T)            | 84,756                        | 137,98                        | 1,811                         | 12,08                | 2,498     | [14]       |
| Сурьма (T)              | 23,535                        | 9,78                          | —                             | 40,43                | 4,282     | [14]       |
| Таллий (T)              | 26,646                        | 14,623                        | —                             | 37,53                | 3,119     | [11]       |
| Тантал (T)              | 4,953                         | 0,594                         | —                             | 201,9                | 3,842     | [11]       |
| Теллур (T)              | 47,716                        | 74,735                        | 0,66                          | 18,242               | 8,404     | [11]       |
| Тербий (T)              | 25,1                          | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| Титан (T)               | 9,1598                        | 1,745                         | —                             | 109,35               | 3,355     | [14]       |
| Торий (T)               | 18,4                          | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| Тулий (T)               | 25,2                          | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| Углерод (алмаз)         | 1,8 [7]                       | —                             | —                             | 560 (T)              | 4 (T)     | [8]        |
| Углерод (графит)        | 30 [7]                        | —                             | —                             | 33,7 (T)             | 12 (T)    | [8]        |
| Уран                    | 10,2                          | 5                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Фосфор (белый)          | 205                           | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Фосфор (черный)         | 29,6                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Фосфор (красный)        | 55,6                          | —                             | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Хром                    | 5,25                          | 0,9                           | —                             | —                    | —         | [7]        |
| Цезий (T)               | 500                           | —                             | —                             | —                    | —         | [12]       |
| Церий (T)               | 54,25                         | 46,32                         | 0,585                         | —                    | —         | [17]       |
| Цинк (T)                | 16,271                        | 5,644                         | —                             | 61,459               | 3,264     | [11]       |
| Цирконий (T)            | 9,676                         | 1,77                          | —                             | 102,84               | 3,142     | [14]       |
| Эрбий (T)               | 22,009                        | 8,3045                        | —                             | 44,913               | 3,537     | [14]       |

\* Параметр  $\xi$  уравнения (4.9) равен: —2, 3 — азот, 65 K; —1,9 — водород, 4 K; —5,1 — криптон, 77 K; —4 — неон, 4 K.

Таблица 4.2. Сжимаемость и модуль объемной упругости некоторых неорганических соединений  
[буквами *T* и *S* отмечены изотермическая и адиабатическая сжимаемости, *a*, *b*, *c* — коэффициенты  
в уравнении (4.6)]

| Вещество                                       | <i>a</i> , 10 <sup>-12</sup> Па <sup>-1</sup> | <i>b</i> , 10 <sup>-22</sup> Па <sup>-2</sup> | <i>c</i> , 10 <sup>-30</sup> Па <sup>-3</sup> | <i>K</i> , 10 <sup>9</sup> Па | <i>K'</i> | Литература |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-----------|------------|
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Al             | 65,1                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| NH <sub>4</sub> Br ( <i>T</i> )                | 62,162                                        | 102,73                                        | 98,655                                        | —                             | —         | [22]       |
| NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 34,75—45,00                                   | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| NH <sub>4</sub> Cl ( <i>T</i> )                | 59,396                                        | 104,55                                        | 96,573                                        | 17,8 [9] ( <i>S</i> )         | —         | [22]       |
| AlB <sub>12</sub> ( <i>S</i> )                 | 7,19                                          | —                                             | —                                             | 139                           | —         | [23]       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <i>S</i> )    | —                                             | —                                             | —                                             | 255,07                        | 4,19      | [10]       |
| AlSb                                           | 16,9 ( <i>T</i> )                             | —                                             | —                                             | 59,2 [9] ( <i>S</i> )         | —         | [24]       |
| Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>              | 30,74—30,9                                    | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| BaO ( <i>T</i> )                               | —                                             | —                                             | —                                             | 74,06                         | 5,67      | [25]       |
| BaSO <sub>4</sub> ( <i>S</i> )                 | —                                             | —                                             | —                                             | 22,3                          | —         | [9]        |
| BaTiO <sub>3</sub> (куб.)                      | 8,91                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| (тетр.)                                        | 5,36                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| BaF <sub>2</sub> ( <i>T</i> )                  | 17,59                                         | 9,6                                           | —                                             | 56,82                         | —         | [26]       |
| Be <sub>2</sub> B ( <i>S</i> )                 | 8,06                                          | —                                             | —                                             | 124                           | —         | [23]       |
| Be <sub>2</sub> B ( <i>S</i> )                 | 8,13                                          | —                                             | —                                             | 123                           | —         | [23]       |
| BeO ( <i>T</i> )                               | 4,13                                          | 4,3                                           | —                                             | —                             | —         | [27]       |
| BN (гекс.) ( <i>T</i> )                        | —                                             | —                                             | —                                             | 25,5                          | 15        | [8]        |
| BN (куб.)                                      | 5                                             | —                                             | —                                             | —                             | —         | [28]       |
| VB <sub>2</sub>                                | 3,47                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| V <sub>3</sub> Ge ( <i>S</i> )                 | —                                             | —                                             | —                                             | 169,2 (3)                     | 3,80 (22) | [29]       |
| V <sub>3</sub> Si ( <i>S</i> )                 | —                                             | —                                             | —                                             | 176,37 (7)                    | 4,30 (4)  | [30]       |
| VC                                             | 2,65                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>                | 27,3                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [31]       |
| H <sub>2</sub> O (4,2 K)                       | 91,743                                        | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| H <sub>2</sub> O VII, <i>p</i> =2,2 ГПа        | —                                             | —                                             | —                                             | 22,7                          | 5,3       | [32]       |
| D <sub>2</sub> O VII, <i>p</i> =2,2 ГПа        | —                                             | —                                             | —                                             | 24,2                          | 4,6       | [32]       |
| WSi <sub>2</sub>                               | 2,96                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| WC                                             | 1,58—1,73                                     | —                                             | —                                             | —                             | —         | [10]       |
| WC <sub>1,007</sub> ( <i>S</i> )               | 3,03 (5)                                      | —                                             | —                                             | 3,29                          | —         | [33]       |
| GaN                                            | 5                                             | —                                             | —                                             | —                             | —         | [24]       |
| GaAs ( <i>T</i> )                              | —                                             | —                                             | —                                             | 74,66                         | 4,67      | [18]       |
| GaSb ( <i>T</i> )                              | —                                             | —                                             | —                                             | 56,14                         | 4,78      | [34]       |
| GaP ( <i>S</i> )                               | 11,27 (6)                                     | —                                             | —                                             | —                             | —         | [35]       |
| HfC <sub>0,967</sub> ( <i>S</i> )              | 4,12 (2)                                      | —                                             | —                                             | 2,42                          | —         | [33]       |
| GeO <sub>2</sub> ( <i>T</i> )                  | —                                             | —                                             | —                                             | 39,1 (4)                      | 2,2 (5)   | [36]       |
| ( <i>S</i> )                                   | —                                             | —                                             | —                                             | 25,9                          | 6,15      | [37]       |
| HoZn <sub>2</sub> ( <i>S</i> )                 | —                                             | —                                             | —                                             | 6,43                          | —         | [38]       |
| EuO                                            | —                                             | —                                             | —                                             | 110 (5)                       | —         | [39]       |
| EuSe                                           | —                                             | —                                             | —                                             | 52 (5)                        | —         | [39]       |
| EuS                                            | —                                             | —                                             | —                                             | 61 (5)                        | —         | [39]       |
| EuTe                                           | —                                             | —                                             | —                                             | 40 (5)                        | —         | [39]       |
| Fe <sub>3</sub> Al ( <i>T</i> )                | —                                             | —                                             | —                                             | 136                           | 4,6       | [8]        |
| FeAl ( <i>T</i> )                              | —                                             | —                                             | —                                             | 138                           | 5,6       | [8]        |
| FeO ( <i>T</i> )                               | —                                             | —                                             | —                                             | 154                           | 3,4       | [8]        |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ( <i>S</i> )    | —                                             | —                                             | —                                             | 161,6                         | —         | [9]        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( <i>S</i> )    | —                                             | —                                             | —                                             | 98                            | —         | [9]        |
| Fe+8% Si ( <i>T</i> )                          | —                                             | —                                             | —                                             | 174                           | 4,6       | [8]        |
| Fe <sub>3</sub> Si ( <i>T</i> )                | —                                             | —                                             | —                                             | 250                           | —2,0      | [8]        |
| Fe+5% Ni (ОЦК)                                 | —                                             | —                                             | —                                             | 155 (1)                       | 4,2 (8)   | [40]       |
| (ГПУ)                                          | —                                             | —                                             | —                                             | 209,0 (1,5)                   | 4,0       | [40]       |
| InBi                                           | 29,1                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [31]       |
| InAs                                           | 17,2                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [24]       |
| InSb                                           | 22,0                                          | —                                             | —                                             | 46,9 [9] ( <i>S</i> )         | —         | [24]       |
| In+10% Tl                                      | 25,0                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [41]       |
| InP                                            | 13,8                                          | —                                             | —                                             | —                             | —         | [24]       |
| YbO                                            | —                                             | —                                             | —                                             | 130                           | 4         | [42]       |
| YbSe                                           | —                                             | —                                             | —                                             | 61 (5)                        | —         | [39]       |
| YbS                                            | —                                             | —                                             | —                                             | 72 (5)                        | —         | [39]       |
| YbTe                                           | —                                             | —                                             | —                                             | 46 (5)                        | —         | [39]       |



| Вещество                                    | $a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $b, 10^{-22} \text{ Па}^{-2}$ | $c, 10^{-30} \text{ Па}^{-3}$ | $K, 10^9 \text{ Па}$ | $K'$      | Литература |
|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------|------------|
| CdO (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 108                  | 9         | [8]        |
| Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> (T)         | 20                            | —                             | —                             | —                    | —         | [43]       |
| CdSe (T)                                    | 35,8                          | 13,9                          | 2,98                          | —                    | —         | [27]       |
| CdS (T)                                     | 26,3                          | 80                            | 1,43                          | —                    | —         | [27]       |
| CdTe (T)                                    | 39,8                          | 88                            | 1,09                          | —                    | —         | [27]       |
| K <sub>2</sub> Al                           | 63,6                          | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| KBr (T)                                     | 60,351                        | 53,606                        | —                             | 15,5 [9] (S)         | —         | [22]       |
| KI (T)                                      | 78,86                         | 112,85                        | —                             | 12,38 [9] (S)        | —         | [22]       |
| KF (T)                                      | 61,814                        | 78,118                        | —                             | —                    | —         | [22]       |
| KCl (T)                                     | 54,906                        | 57,969                        | —                             | —                    | —         | [22]       |
| CaO (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 112,0                | 3,9       | [8]        |
| CaS (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 56,7                 | 4,9       | [8]        |
| CoO                                         | 20 (1) [44]                   | —                             | —                             | 190,5                | 3,9       | [8]        |
| CoF <sub>2</sub>                            | 9,2                           | —                             | —                             | —                    | —         | [45]       |
| $\alpha$ -SiO <sub>2</sub>                  | —                             | —                             | —                             | 36,4—37,7            | —         | [10]       |
| $\beta$ -SiO <sub>2</sub>                   | 17,71                         | —                             | —                             | 56,5 [9] (S)         | —         | [10]       |
| SiO <sub>2</sub> (стишовит)                 | —                             | —                             | —                             | 481,5 (S)            | —         | [9]        |
| SiC                                         | 4,26                          | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| $\beta$ -SiC                                | 4,6                           | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| SiP <sub>2</sub>                            | —                             | —                             | —                             | 128,4 (3)            | 8,2 (5)   | [46]       |
| LiBr (T)                                    | 38,951                        | 21,239                        | —                             | 25,66 [9] (S)        | —         | [22]       |
| LiH                                         | —                             | —                             | —                             | 32,35                | 3,80 (15) | [47]       |
| Li <sup>7</sup> H                           | 29,8                          | —                             | —                             | —                    | 4         | [48]       |
| Li <sup>6</sup> H                           | 29,5                          | —                             | —                             | —                    | 4         | [48]       |
| Li <sup>7</sup> D                           | 29,4                          | —                             | —                             | —                    | 4         | [48]       |
| Li <sup>6</sup> D                           | 28,5                          | —                             | —                             | —                    | 4         | [48]       |
| LiI (T)                                     | 57,466                        | 66,674                        | 43,154                        | 18,83 [9] (S)        | —         | [22]       |
| LiF (T)                                     | 15,491                        | 6,5364                        | —                             | 69,8 [9] (S)         | —         | [22]       |
| LiCl (T)                                    | 30,342                        | 13,705                        | —                             | 31,53 [9] (S)        | —         | [22]       |
| MgO                                         | 6,45—6,52                     | —                             | —                             | 178,0 [8] (T)        | 4 [8] (T) | [10]       |
| MgCu <sub>2</sub> (S)                       | —                             | —                             | —                             | 87,99                | —         | [49]       |
| Mg <sub>2</sub> Sn (S)                      | —                             | —                             | —                             | 41,66                | —         | [50]       |
| MgF <sub>2</sub> (T)                        | 10,0                          | —                             | —                             | —                    | —         | [45]       |
| MnBi парамагнетик                           | 26,4                          | —                             | —                             | —                    | —         | [51]       |
| ферромагнетик                               | 21,0                          | —                             | —                             | —                    | —         | [51]       |
| MnO                                         | —                             | —                             | —                             | 144,0                | 3,3       | [8]        |
| MnAs 273 K                                  | 27,9                          | —                             | —                             | —                    | —         | [51]       |
| 315 K                                       | 57,9                          | —                             | —                             | —                    | —         | [51]       |
| MnS (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 81,0                 | 3,3       | [8]        |
| MnF <sub>2</sub> (T)                        | 11,5                          | —                             | —                             | —                    | —         | [45]       |
| Cu <sub>3</sub> Au                          | 5,25—6,30                     | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| CuBr (T)                                    | 29,325                        | 25,314                        | 22,872                        | —                    | —         | [22]       |
| CuGa                                        | 7,34—7,44                     | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| CuGe                                        | 7,34—7,51                     | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| Cu <sub>2</sub> O                           | —                             | —                             | —                             | 111,96 (27)          | —         | [52]       |
| CuSi                                        | 7,17—7,53                     | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| CuZn                                        | 7,47—7,87                     | —                             | —                             | 116,2 [9] (S)        | —         | [10]       |
| MoSi <sub>2</sub>                           | 3,57                          | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| Mo <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>             | 9,79                          | —                             | —                             | —                    | —         | [10]       |
| As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (стекло)    | 69,6 (S)                      | —                             | —                             | 14,37 (S)            | —         | [53]       |
| $\beta$ -As <sub>4</sub> S <sub>3</sub> (T) | —                             | —                             | —                             | 17,0                 | 5,5       | [54]       |
| NaNO <sub>2</sub>                           | —                             | —                             | —                             | 21,9 (2)             | 4,3 (8)   | [55]       |
| NaNO <sub>3</sub>                           | —                             | —                             | —                             | 25,8 (6)             | 6,6 (1,5) | [55]       |
| NaBr (T)                                    | 48,734                        | 51,871                        | 34,037                        | 21,07 [9] (S)        | —         | [22]       |
| NaBrO <sub>3</sub>                          | 32,4                          | —                             | —                             | 30,8 [9] (S)         | —         | [10]       |
| NaI (T)                                     | 66,622                        | 96,809                        | 81,299                        | 15,0 [8]             | 4,1 [8]   | [22]       |
| NaF (T)                                     | 20,648                        | 9,0621                        | —                             | 45,6 [8]             | 5,7 [8]   | [22]       |
| NaCl (T)                                    | 42,730                        | 46,578                        | 32,499                        | 26,4 [8]             | 3,9 [8]   | [22]       |
| NaClO <sub>3</sub>                          | 36,63—39,11                   | —                             | —                             | 25,6 [9] (S)         | —         | [10]       |
| NiO (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 199,0                | 4,1       | [8]        |
| NiF <sub>2</sub> (T)                        | 8,4 [45]                      | —                             | —                             | 119,75               | 5,07      | [56]       |
| NbO <sub>2</sub> (S)                        | —                             | —                             | —                             | 236 (6)              | —         | [57]       |
| NbC                                         | 4,38 [10]                     | —                             | —                             | 320,0 (T)            | 14,0 (T)  | [8]        |
| SnI <sub>4</sub>                            | 201 [58]                      | —                             | —                             | 7,9 (T)              | 5,8 (T)   | [8]        |
| SnO <sub>2</sub> (S)                        | —                             | —                             | —                             | 212,3                | 5,13      | [59]       |

| Вещество                                    | $a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $b, 10^{-22} \text{ Па}^{-2}$ | $c, 10^{-30} \text{ Па}^{-3}$ | $K, 10^6 \text{ Па}$ | $K'$        | Литература |
|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------|------------|
| PrSb (T)                                    | 19,8                          | —                             | —                             | —                    | —           | [60]       |
| RbBr (T)                                    | 76,9                          | —                             | —                             | 13,81 [9] (S)        | —           | [61]       |
| RbI (T)                                     | 94,8                          | —                             | —                             | 11,1 [9] (S)         | —           | [61]       |
| RbF (T)                                     | 38,1                          | —                             | —                             | 27,33 [9] (S)        | —           | [61]       |
| RbCl (T)                                    | 64,0                          | —                             | —                             | 16,2 [9] (S)         | —           | [61]       |
| HgSe                                        | 25,4                          | —                             | —                             | —                    | —           | [24]       |
| HgTe                                        | 24,0                          | —                             | —                             | —                    | —           | [24]       |
| HgS                                         | 26,7                          | —                             | —                             | —                    | —           | [24]       |
| SmSe                                        | —                             | —                             | —                             | 40 (5)               | —           | [39]       |
| SmS                                         | —                             | —                             | —                             | 15,1                 | —           | [39]       |
| SmTe                                        | —                             | —                             | —                             | 40 (5)               | —           | [39]       |
| Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>           | 27,93                         | —                             | —                             | 37,0 [9] (S)         | —           | [10]       |
| PbSe (S)                                    | —                             | —                             | —                             | 54,1                 | —           | [62]       |
| PbS                                         | 16,08—16,85                   | —                             | —                             | 62 [9] (S)           | —           | [10]       |
| AgBr (T)                                    | 24,981                        | 13,451                        | —                             | 40,7 [9] (S)         | —           | [22]       |
| AgIn                                        | 10,18                         | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| AgCd                                        | 9,75—9,86                     | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| AgMg                                        | 10,02—10,38                   | —                             | —                             | 86 [8] (T)           | 3,6 [8] (T) | [10]       |
| AgSn                                        | 9,82                          | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| AgPd                                        | 9,4                           | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| AgF (T)                                     | 24,665                        | 38,967                        | —                             | —                    | —           | [22]       |
| AgCl (T)                                    | 22,951                        | 11,8                          | —                             | 44,1 [9] (S)         | —           | [22]       |
| AgZn                                        | 9,69—9,87                     | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| SrTiO <sub>3</sub>                          | 5,46 [10]                     | —                             | —                             | 176 (T)              | 4,4 (T)     | [63]       |
| SrO (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 89,28                | 5,23        | [25]       |
| TiAl                                        | 54                            | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| TiBr                                        | 44,51                         | —                             | —                             | 22,5 [9] (S)         | —           | [10]       |
| TiBrI                                       | 45,45—50,42                   | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| TiBrCl                                      | 43,92                         | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| TiI (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 45                   | 5,0         | [8]        |
| TiCl                                        | 38,75                         | —                             | —                             | —                    | —           | [64]       |
| TaC (T)                                     | —                             | —                             | —                             | 330                  | 3,3         | [8]        |
| TeO <sub>2</sub>                            | 22,33                         | —                             | —                             | —                    | —           | [65]       |
| TiN                                         | 3,42—3,47                     | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| TiBe <sub>12</sub> (S)                      | 7,46                          | —                             | —                             | 134                  | —           | [23]       |
| TiB <sub>2</sub> (S)                        | 3,98                          | —                             | —                             | 251                  | —           | [23]       |
| TiO (T)                                     | 3,68                          | —                             | —                             | —                    | —           | [66]       |
| TiSi <sub>2</sub>                           | 6,12                          | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| TiC                                         | 4,38 [10]                     | —                             | —                             | 220 (T)              | 8 (T)       | [8]        |
| TmSb (T)                                    | 17,8                          | —                             | —                             | —                    | —           | [60]       |
| TmTe                                        | —                             | —                             | —                             | 46,5                 | —           | [39]       |
| UN                                          | 5,35                          | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| UO <sub>2</sub> (T)                         | —                             | —                             | —                             | 210 (10)             | 7 (2)       | [67]       |
| $\alpha$ -P <sub>4</sub> S <sub>3</sub> (T) | —                             | —                             | —                             | 5,9                  | —           | [68]       |
| CrN                                         | 4,36—4,38                     | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| Cr <sub>2</sub> FeO <sub>4</sub> (S)        | —                             | —                             | —                             | 203,7                | —           | [9]        |
| $\alpha$ -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 3,92                          | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| CrAs                                        | 28,3                          | —                             | —                             | —                    | —           | [69]       |
| CsBr (T)                                    | 65,652                        | 96,190                        | 73,963                        | 18,0 [9] (S)         | —           | [22]       |
| CsI (T)                                     | 78,488                        | 130,42                        | 115,48                        | 12,4 [9] (S)         | —           | [22]       |
| CsF (T)                                     | 42,5                          | —                             | —                             | —                    | —           | [61]       |
| CsCl (T)                                    | 56,401                        | 73,842                        | 54,194                        | —                    | —           | [22]       |
| CeAs (T)                                    | 7,9                           | —                             | —                             | —                    | —           | [70]       |
| CeSb (T)                                    | 10                            | —                             | —                             | —                    | —           | [70]       |
| CeP (T)                                     | 6,6                           | —                             | —                             | —                    | —           | [70]       |
| ZnO (T)                                     | 22,2                          | 3,7                           | —                             | —                    | —           | [27]       |
| ZnSe (T)                                    | 24,69                         | —                             | —                             | —                    | —           | [27]       |
| ZnS (T)                                     | 13,1                          | 4,10                          | —                             | —                    | —           | [27]       |
| ZnSO <sub>4</sub>                           | 45,34                         | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| ZnTe (T)                                    | 24,27                         | —                             | —                             | —                    | —           | [27]       |
| ZnF <sub>2</sub> (T)                        | 9,6                           | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| ZrN                                         | 3,74—3,77                     | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| ZrSi <sub>2</sub>                           | 6,12                          | —                             | —                             | —                    | —           | [10]       |
| ZrC (T)                                     | 5,9 (5) (S) [33]              | —                             | —                             | 195,0                | 8           | [8]        |

Таблица 4.3. Сжимаемость минералов [7].  
Приведены коэффициенты уравнения (4.6)

Продолжение табл. 4.3

| Вещество    | $a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $b, 10^{-22} \text{ Па}^{-2}$ | Вещество   | $a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $b, 10^{-22} \text{ Па}^{-2}$ | Вещество    | $a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $b, 10^{-22} \text{ Па}^{-2}$ | Вещество    | $a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $b, 10^{-22} \text{ Па}^{-2}$ |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Авгит       | 10,2                          | —                             | Вюрцит     | 13,6                          | —                             | Мусковит    | 12                            | —                             | Фаялит      | 9,1                           | —                             |
| Альбит      | 20,2                          | 21,6                          | Галенит    | 18,7                          | —                             | Нефелин     | 20,5                          | 5,2                           | Флогопит    | 23,4                          | 18,2                          |
| Альмандин   | 5,45                          | —                             | —          | 19,6                          | —                             | Ортоклаз    | 21,23                         | 14,5                          | Флюорит     | 12,2                          | 6,5                           |
| —           | 5,7                           | —                             | Гипс       | 25                            | —                             | Периклаз    | 5,98                          | 1                             | —           | 12,6                          | —                             |
| Анальцим    | 19,70                         | —                             | Диопсид    | 9,3                           | 3,1                           | Пирит       | 6,8                           | —                             | Форстерит   | 7,9                           | —                             |
| —           | 36,73                         | —                             | Доломит    | 12,2                          | —                             | —           | 7,1                           | —                             | —           | 8,2                           | —                             |
| Ангидрит    | 18,4                          | —                             | Жадент     | 7,5                           | —                             | Родохрозит  | 13                            | —                             | Халькопирит | 12,9                          | —                             |
| Англезит    | 19,4                          | —                             | —          | 11,1                          | —                             | Рутил       | 4,83                          | 0,92                          | Хромит      | 4,9                           | —                             |
| Апатит      | 10,91                         | 4,1                           | Ильменит   | 5,6                           | —                             | Сидерит     | 10                            | —                             | Целестит    | 15,7                          | —                             |
| Арагонит    | 15,5                          | —                             | Иодаргирит | 41,1                          | —                             | Сподумен    | 7,03                          | 1,5                           | —           | 16,3                          | —                             |
| Аргентит    | 25,1                          | 33,8                          | Кальцит    | 13,67                         | 3,9                           | Ставролит   | 8                             | —                             | Церуссит    | 19,1                          | —                             |
| Арсенопирит | 9,9                           | —                             | Кераргирит | 24                            | —                             | Стронцианит | 17,5                          | —                             | Цинкит      | 7,8                           | —                             |
| Барит       | 17,7                          | —                             | Кобальтин  | 7,67                          | 1,9                           | —           | —                             | —                             | Циркон      | 8,6                           | —                             |
| —           | 18,1                          | —                             | Куприт     | 19,4                          | 19                            | Сфалерит    | 13,03                         | 1,28                          | —           | —                             | —                             |
| Берилл      | 5,403                         | 0,94                          | Лабрадор   | 13,9                          | —                             | Тенардит    | 23,7                          | 23,7                          | Эгирин      | 9,4                           | —                             |
| Бромирит    | 27,4                          | —                             | —          | 15,0                          | —                             | Топаз       | 6,11                          | 1,1                           | Энстатит    | 10,1                          | —                             |
| Висмутин    | 33,2                          | —                             | Марказит   | 8,2                           | —                             | Турмалин    | 8,16                          | 1,95                          | Эпсомит     | 22,9                          | —                             |
| Витерит     | 20,3                          | —                             | Микроклин  | 19,2                          | 13                            | —           | —                             | —                             | —           | —                             | —                             |

Таблица 4.4. Сжимаемость и модуль объемной упругости органических веществ и полимеров

| Вещество               | $k, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $K, 10^9 \text{ Па}$ | $K'$   | $K'', 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ | Литература |
|------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|---------------------------------|------------|
| Адамантан              | 243                           | —                    | —      | —                               | [71]       |
| Антрахинон             | —                             | 8,092                | 11,016 | —15,62                          | [72]       |
| Антрацен               | —                             | 6,786                | 8,960  | —9,261                          | [72]       |
| Антрацен               | —                             | 7,344                | 9,061  | —10,027                         | [72]       |
| Бензил                 | —                             | 6,129                | 7,168  | —7,063                          | [72]       |
| Бензофенон             | —                             | 6,421                | 10,328 | —12,413                         | [72]       |
| Гексабромбензол        | —                             | 8,089                | 11,067 | —13,51                          | [72]       |
| Гексаметилбензол       | —                             | 5,600                | 10,272 | —21,083                         | [72]       |
| Гексаметилентетрамин   | 117                           | —                    | —      | —                               | [71]       |
| n-Гептакозан           | 193                           | —                    | —      | —                               | [71]       |
| Гексахлорбензол        | —                             | 8,388                | 8,223  | —                               | [72]       |
| пара-Дийодбензол       | —                             | 7,8                  | 7,0    | —                               | [8]        |
| Дифенил                | —                             | 4,570                | 9,942  | —13,088                         | [72]       |
| 9-10-дифенилантрацен   | —                             | 7,316                | 9,467  | —11,258                         | [72]       |
| Нафталин               | 65 (5)                        | —                    | —      | —                               | [73]       |
| Найлон 6 (γ)           | 179                           | —                    | —      | —                               | [71]       |
| Пентаэритрит           | 83                            | —                    | —      | —                               | [71]       |
| Перилен                | —                             | 10,141               | 7,701  | —                               | [72]       |
| Перинафтенон           | —                             | 7,706                | 7,778  | 0,99                            | [72]       |
| Поли-1-бутилен         | 202                           | —                    | —      | —                               | [71]       |
| Поливинилиденфторид II | 94,7                          | —                    | —      | —                               | [71]       |

| Вещество                           | $k, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $K, 10^{-9} \text{ Па}$ | $K'$  | $K'', 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ | Литература |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------|---------------------------------|------------|
| Поли(4-метил-1-пента)              | 367                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Полиоксиметилен                    | 117                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Полипропилен                       | 207                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Политетраметилеоксид-1             | 178                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Политетрафторэтилен, 297 К         | 250                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Политетрафторэтилен II, 283 К      | 189                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Полиэтилен низкой плотности        | 192                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Полиэтилен высокой плотности       | 156                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| Поли(этилен-оксисбензоат) $\alpha$ | 138                           | —                       | —     | —                               | [71]       |
| пара-Терфенил                      | —                             | 5,428                   | 9,609 | —8,844                          | [72]       |

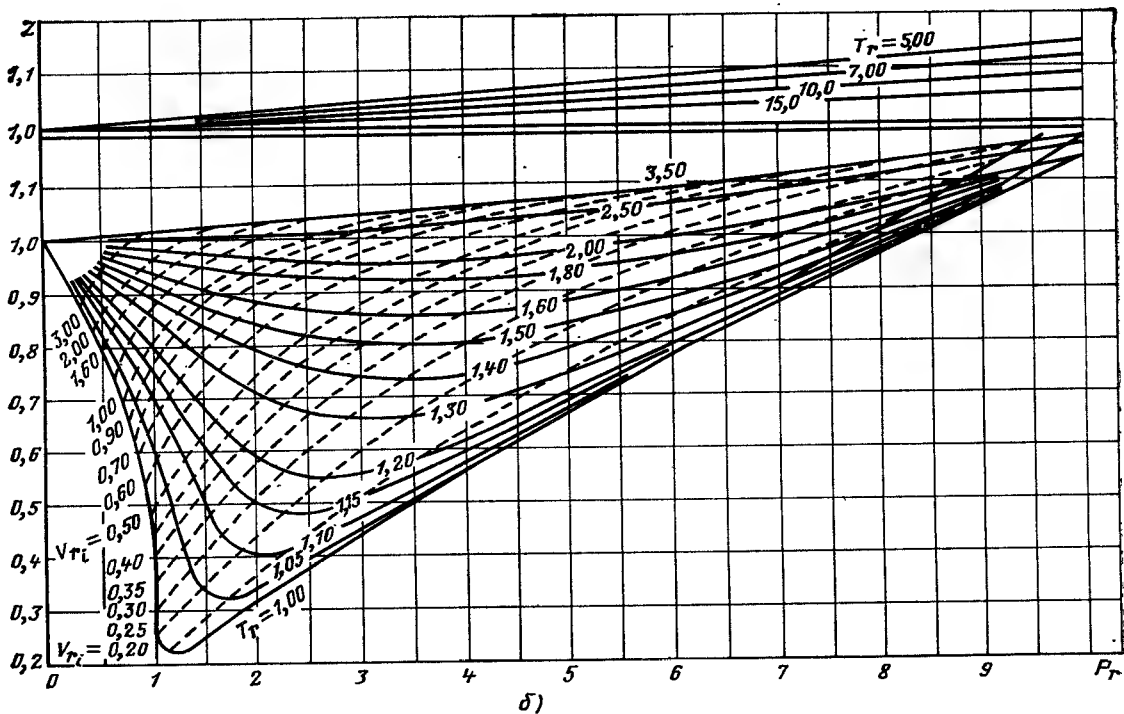
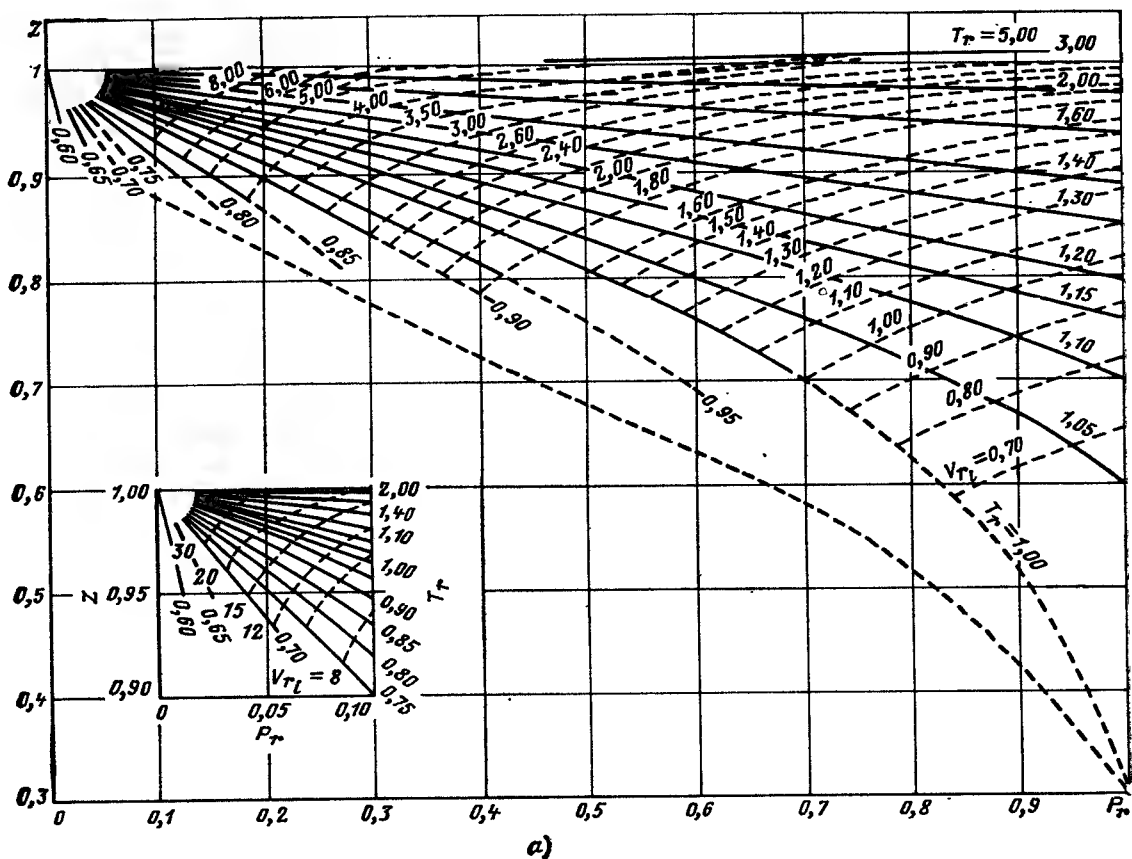
Таблица 4.5. Линейная сжимаемость  $k_i$  анизотропных минералов и органических веществ в направлении главных осей

| Вещество                                                                    | $k_a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $k_b, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $k_c, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | Литература |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|
| Апатит                                                                      | 4,23                            | —                               | 2,45                            | [7]        |
| Барит                                                                       | 5,026                           | 6,816                           | 5,760                           | [7]        |
| Берилл                                                                      | 1,664                           | —                               | 2,075                           | [7]        |
| Графит                                                                      | —1,65                           | —                               | 33,1                            | [74]       |
| Кальцит                                                                     | 2,73                            | —                               | 8,22                            | [7]        |
| Кварц                                                                       | 9,95                            | —                               | 7,18                            | [7]        |
| Нафталин                                                                    | 55                              | 31                              | 26                              | [73]       |
| Ортоклаз                                                                    | 10,13                           | 5,59                            | 4,68                            | [7]        |
| Парафин $n\text{-C}_{30}\text{H}_{62}$<br>( $p = 3 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ) | 67                              | 63                              | —                               | [75]       |
| Парафин $n\text{-C}_{32}\text{H}_{66}$<br>( $p = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ) | 78                              | 67                              | —                               | [75]       |
| Полиэтилен высокой плотности                                                | 87,7                            | 67,2                            | 1,3                             | [71]       |
| Рутил                                                                       | 1,90                            | —                               | 1,05                            | [7]        |
| Сподумен                                                                    | 1,83                            | 2,50                            | 2,03                            | [7]        |
| Топаз                                                                       | 2,176                           | 1,504                           | 2,429                           | [7]        |
| Турмалин                                                                    | 1,65                            | —                               | 4,86                            | [7]        |
| Целестит                                                                    | 6,380                           | 4,553                           | 4,615                           | [7]        |

Таблица 4.6. Линейная сжимаемость  $k_i$  анизотропных элементов и неорганических соединений в направлении главных осей

| Вещество                                 | $k_a, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $k_b, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | $k_c, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ | Литература |
|------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|
| BaTiO <sub>3</sub>                       | 1,9                             | —                               | 4                               | [76]       |
| Be                                       | 2,87                            | —                               | 2,23                            | [7]        |
| BN (гекс.)                               | —                               | —                               | 34                              | [77]       |
| Bi                                       | 6,8 (4)                         | —                               | 18,7 (7)                        | [78]       |
| Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>          | 7,3                             | —                               | 12,7                            | [31]       |
| In                                       | 9,1 (7)                         | —                               | 7,0 (7)                         | [79]       |
| InBi                                     | 2,5                             | —                               | 24,1                            | [31]       |
| Cd                                       | 2,299                           | —                               | 15,88                           | [7]        |
| CdS                                      | 5,9                             | —                               | 3,5                             | [80]       |
| Co                                       | 1,72                            | —                               | 1,81                            | [7]        |
| Mg                                       | 9,99                            | —                               | 9,84                            | [7]        |
| MnBi (ферромагнетик)                     | 7,9 (5)                         | —                               | 10,6 (2)                        | [51]       |
| MnBi (парамагнетик)                      | 5,2 (6)                         | —                               | 10,5 (2)                        | [51]       |
| MnAs (273 К)                             | 8,7 (9)                         | —                               | 9,6 (3)                         | [51]       |
| MnAs (315 К)                             | 16,6 (6)                        | 23,4 (8)                        | 17,9 (8)                        | [51]       |
| MnP                                      | 1,53                            | 1,54                            | 5,18                            | [81]       |
| As                                       | —4,6                            | —                               | 26,4                            | [82]       |
| $\beta\text{-As}_4\text{S}_3$            | 22                              | 14                              | 15                              | [54]       |
| NaNO <sub>2</sub>                        | 26,3 (1,0)                      | 12,2 (6)                        | 7,3 (7)                         | [55]       |
| NaNO <sub>3</sub>                        | 7,18 (6)                        | —                               | 25 (1)                          | [55]       |
| $\beta\text{-Sn}$                        | 6,13                            | —                               | 6,84                            | [7]        |
| PbTiO <sub>3</sub>                       | 1,4                             | —                               | 14,3                            | [83]       |
| Se                                       | —3,3                            | —                               | 40                              | [84]       |
| (SN) <sub>x</sub> (10 <sup>5</sup> Па)   | 55 (5)                          | 22 (2)                          | 50 (5)                          | [85]       |
| (SN) <sub>x</sub> (2·10 <sup>9</sup> Па) | 7                               | 3,1                             | 7                               | [85]       |
| Sb (структ. As)                          | 4,9                             | —                               | 14,8                            | [86]       |
| Sb (куб.)                                | 3,2                             | —                               | 20,6                            | [86]       |
| Te                                       | 28,01                           | —                               | —4,23                           | [7]        |
| TeO <sub>2</sub>                         | 8,11                            | —                               | 6,11                            | [65]       |
| CrAs (190 К)                             | 4,7                             | 8,5                             | 5,8                             | [51]       |
| CrAs (293 К)                             | 1,04 (80)                       | 28,0 (80)                       | 0,73 (80)                       | [51]       |
| Zn                                       | 1,59                            | —                               | 13,76                           | [7]        |
| $\alpha\text{-Zr}$                       | 5,09 (46)                       | —                               | 5,99 (93)                       | [87]       |
| $\omega\text{-Zr}$                       | 3,08 (29)                       | —                               | 2,97 (27)                       | [87]       |
| ZrSiO <sub>4</sub>                       | 0,92 (7)                        | —                               | 0,83 (21)                       | [88]       |

4.3. СЖИМАЕМОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ  
(табл. 4.7—4.11, рис. 4.1)



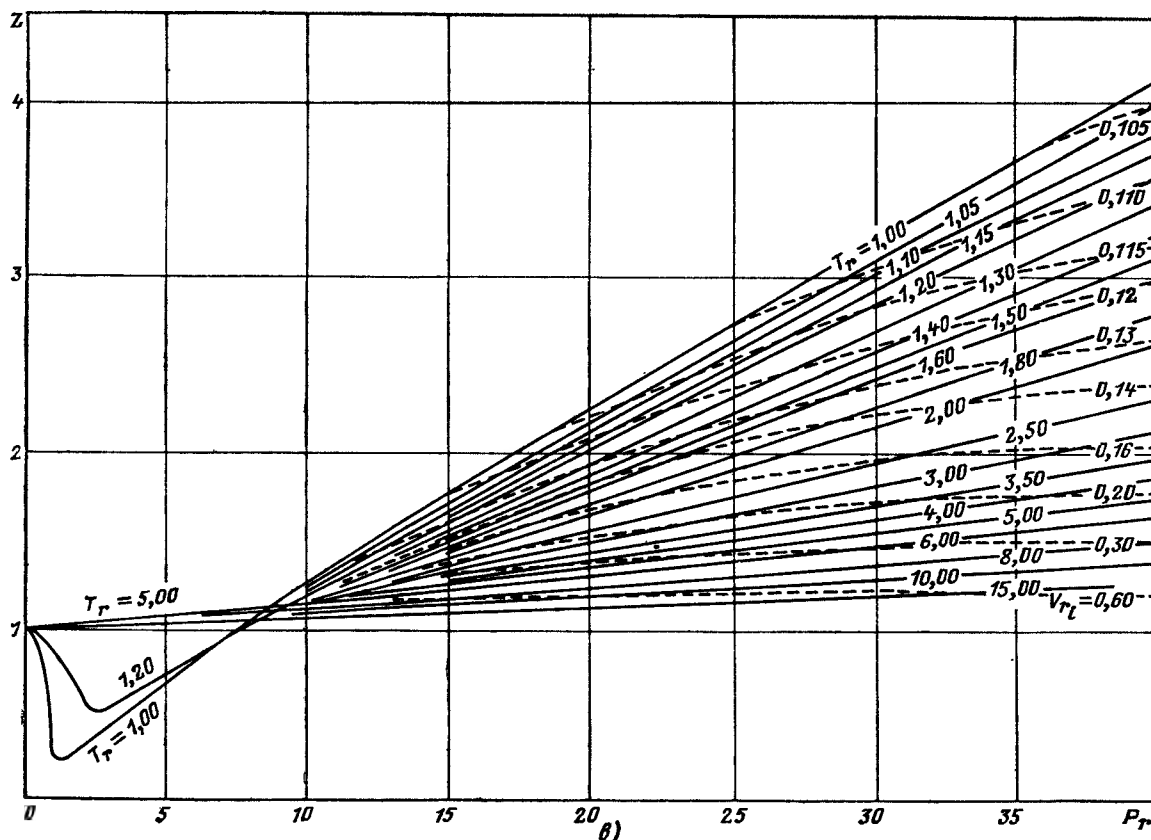


Рис. 4.1. Зависимость фактора сжимаемости жидкостей и газов  $Z$  от приведенного давления  $P_r$  при различной приведенной температуре  $T_r$  [5] (а— $0 \leq p_r \leq 1$ ; б— $0 \leq p_r \leq 10$ ; в— $0 \leq p_r \leq 40$ )

Таблица 4.7. Параметры уравнения Тэйта и сжимаемость жидкостей

| Жидкость                     | $T$ , К | Диапазон давлений, $10^6$ Па | $C$    | $B$ , $10^6$ Па | $k$ , $10^{-12}$ Па $^{-1}$ | Литература |
|------------------------------|---------|------------------------------|--------|-----------------|-----------------------------|------------|
| Ацетон                       | 273     | 1—500                        | —      | —               | 809                         | [89]       |
|                              | 273     | 500—1000                     | —      | —               | 582                         | [89]       |
| Бензин ( $C_{7,1}H_{14,5}$ ) | 296,5   | —                            | 0,111  | 874             | —                           | [90]       |
|                              | 373     | —                            | 0,111  | 585             | —                           | [90]       |
|                              | 423     | —                            | 0,111  | 200             | —                           | [90]       |
| Бензол                       | 286     | 0,4—18                       | —      | —               | 859                         | [89]       |
| Бром                         | 293     | 100—200                      | —      | —               | 570                         | [91]       |
| Глицерин                     | 288     | 1—10                         | —      | —               | 217                         | [89]       |
| Керосин                      | 289,5   | —                            | —      | —               | 687                         | [93]       |
| Масло:                       |         |                              |        |                 |                             |            |
| касторовое                   | —       | —                            | —      | —               | 470                         | [92]       |
| миндальное                   | 290     | —                            | —      | —               | 543                         | [89]       |
| парафиновое                  | 287,8   | —                            | —      | —               | 619                         | [93]       |
| прованское                   | 293,5   | —                            | —      | —               | 625                         | [93]       |
| Ртуть                        | 293     | —                            | —      | —               | 40,4                        | [7]        |
| Сероуглерод                  | 273     | 1—500                        | —      | —               | 652                         | [89]       |
| Спирт:                       |         |                              |        |                 |                             |            |
| бутиловый                    | 290,4   | 8                            | —      | —               | 888                         | [89]       |
| метиловый                    | 273     | 1—500                        | —      | —               | 784                         | [89]       |
|                              | 293     | 1000—6000                    | 0,1018 | 937             | —                           | [94]       |
|                              | 323     | 1000—6000                    | 0,1018 | 774             | —                           | [94]       |
| пропиловый                   | 293     | 1000—8000                    | 0,0870 | 913             | —                           | [94]       |
|                              | 323     | 1000—7000                    | 0,0870 | 731             | —                           | [94]       |
| этиловый                     | 273     | 1—50                         | —      | —               | 948                         | [89]       |
|                              | 293     | 1—50                         | —      | —               | 1106                        | [89]       |
| Толуол                       | 298     | —                            | —      | —               | 915                         | [92]       |
| Углерод четыреххлористый     | 293     | 100—200                      | —      | —               | 895                         | [89]       |
| Этилацетат                   | 286,3   | 8—37                         | —      | —               | 1027                        | [93]       |

Таблица 4.8. Сжимаемость воды  $k$ ,  $10^{-14}$  Па $^{-1}$  [95]

| $p$ , $10^7$ Па | Температура $t$ , °C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | 0                    | 10     | 25     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     | 100    |
| 0               | 50 885               | 47 810 | 45 246 | 44 240 | 44 174 | 44 496 | 45 161 | 46 143 | 47 430 | 49 018 |
| 1               | 49 479               | 46 563 | 44 106 | 43 113 | 43 021 | 43 296 | 43 891 | 44 783 | 45 959 | 47 413 |
| 2               | 48 122               | 45 362 | 43 012 | 42 037 | 41 925 | 42 158 | 42 693 | 43 505 | 44 581 | 45 916 |
| 5               | 44 313               | 42 014 | 39 989 | 39 091 | 38 942 | 39 082 | 39 476 | 40 101 | 40 943 | 41 991 |
| 10              | 38 745               | 37 167 | 35 684 | 34 969 | 34 820 | 34 890 | 35 155 | 35 597 | 36 199 | 36 943 |

Таблица 4.9. Сжимаемость жидких металлов в точке плавления

| Металл   | $k_S$ ,<br>$10^{-12}$ Па $^{-1}$ | $k_T$ ,<br>$10^{-12}$ Па $^{-1}$ | Литература | Металл    | $k_S$ ,<br>$10^{-12}$ Па $^{-1}$ | $k_T$ ,<br>$10^{-12}$ Па $^{-1}$ | Литература |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|------------|
| Барий    | 170                              | 179                              | [95]       | Олово     | 27,5                             | —                                | [96]       |
| Висмут   | 36,5                             | —                                | [96]       | Прозеодим | 40,8                             | 41,7                             | [67]       |
| Галлий   | 21,6                             | —                                | [96]       | Ртуть     | 9,2                              | —                                | [96]       |
| Индий    | 28,6                             | —                                | [96]       | Рубидий   | 421                              | —                                | [96]       |
| Иттербий | 99,1                             | 116,9                            | [97]       | Свинец    | 28,8                             | —                                | [96]       |
| Кадмий   | 25,5                             | —                                | [96]       | Стронций  | 116                              | 131                              | [95]       |
| Кальций  | 82,7                             | 110                              | [95]       | Цезий     | 573                              | —                                | [96]       |
| Лантан   | 41,0                             | 42,4                             | [97]       | Церий     | 52,2                             | 53,0                             | [97]       |
| Магний   | 38,1                             | 50,6                             | [95]       | Цинк      | 19,2                             | —                                | [96]       |
| Натрий   | 175                              | —                                | [96]       |           |                                  |                                  |            |

Таблица 4.10. Сжимаемость расплавов [99]

| Вещество       | $T$ , К | $k$ , $10^{-12}$ Па $^{-1}$ | Вещество       | $T$ , К | $k$ , $10^{-12}$ Па $^{-1}$ |
|----------------|---------|-----------------------------|----------------|---------|-----------------------------|
| $Al_2I_6$      | 467     | 860                         | $LiClO_4$      | 529     | 251                         |
|                | 489     | 890                         |                | 561     | 230                         |
| $GaI_3$ [100]  | 500     | 783                         | $NaNO_2$       | 573     | 180                         |
| $InI_3$ [100]  | 500     | 596                         | $NaNO_3$       | 605     | 202                         |
| $I_2$          | 393     | 452                         |                | 673     | 230                         |
|                | 413     | 527                         | $Na_2S_4$      | 595     | 171                         |
|                | 443     | 646                         | $Na_2S_6$      | 595     | 180                         |
| $ICl$          | 309     | 540                         | $NaClO_3$      | 538     | 291                         |
|                | 341     | 630                         | $RbNO_3$ [100] | 623     | 203                         |
| $CdI_2$        | 661     | 430                         |                | 686     | 230                         |
| $KNO_3$ [100]  | 623     | 185                         | $AgBr$         | 722     | 96                          |
|                | 723     | 257                         |                | 791     | 111                         |
| $KSCN$         | 457     | 246                         | $AgCl$         | 731     | 84                          |
|                | 495     | 265                         |                | 783     | 98                          |
| $K_2Cr_2O_7$   | 684     | 167                         | $CsI$          | 923     | 650                         |
|                | 741     | 187                         |                | 973     | 690                         |
| $LiNO_3$ [100] | 573     | 197                         | $CsCl$         | 944     | 410                         |
|                | 673     | 241                         |                | 1021    | 484                         |

Таблица 4.11. Коэффициенты уравнения Тэйтта (4.10) и логарифмического уравнения (4.11) для плотных газов [4]

| Вещество                                                                                                       | $t$ , °C | $p$ , Па | $C$    | $B$ ,<br>$10^5$ Па | $A$ , см $^3$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|--------|--------------------|---------------|
| Азот<br>( $p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па в уравнении Тэйтта;<br>$p_0 = 2 \cdot 10^8$ Па в логарифмическом уравнении)  | 0        | 3—12     | 0,3678 | —1200              | —             |
|                                                                                                                | 25       |          |        | —1326              | —             |
|                                                                                                                | 50       |          |        | —1420              | 51,13         |
|                                                                                                                | 100      |          |        | —1576              | 49,45         |
|                                                                                                                | 200      |          |        | —1818              | 47,39         |
|                                                                                                                | 300      |          |        | —1970              | 46,71         |
| Аммиак<br>( $p_0 = 1 \cdot 10^8$ Па в уравнении Тэйтта и логарифмическом уравнении)                            | 400      |          |        | —2100              | 46,16         |
|                                                                                                                | 50       | 1—10     | 0,3084 | 673                | 87,7          |
|                                                                                                                | 100      |          |        | 142                | 74,67         |
|                                                                                                                | 150      |          |        | —184               | 66,76         |
| Аргон<br>( $p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па в уравнении Тэйтта;<br>$p_0 = 2 \cdot 10^8$ Па в логарифмическом уравнении) | 200      |          |        | —280               | —             |
|                                                                                                                | 400      |          |        |                    |               |
|                                                                                                                | 100      | 3—10     | 0,3678 | —1610              | 45,33         |
|                                                                                                                | 200      |          |        | —1852              | 42,16         |
| Водород<br>( $p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па)                                                                          | 400      |          |        | —2165              | 39,78         |
|                                                                                                                |          |          |        |                    |               |
|                                                                                                                | 25       | 3—7      | 0,4771 | —1625              | —             |
|                                                                                                                | 50       |          |        | 0,4804             | —1685         |
| Гелий<br>( $p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па)                                                                            | 100      |          |        | 0,4852             | —1766         |
|                                                                                                                | 150      |          |        | 0,4922             | —1843         |
|                                                                                                                | 20       | 3—7      | 0,4776 | —1995              | —             |
|                                                                                                                | 50       |          |        | 0,5101             | —1925         |
|                                                                                                                | 100      |          |        | 0,5198             | —1965         |
|                                                                                                                | 150      |          |        | 0,5276             | —2005         |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. — 2-е изд. М.: Наука. 1964.
2. Murnaghan F. D.//Proc. Nat. Acad. Sci. 1944. Vol. 30. P. 244—248.
3. Birch F.//J. Geophys. Res. 1952. Vol. 57. P. 227—286.
4. Циклис Д. С. Плотные газы. М.: Химия. 1977
5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства жидкостей и газов. — 3-е изд.: Пер. с англ./Под ред. Б. И. Соколова. Л.: Химия. 1982.
6. Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Functionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, Gruppe IV, Bd 4, Eigenschaften der Materie bei hohen Drucken. Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer-Verlag, 1980.
7. Birch F.//Handbook of Physical Constants. N. Y.: Geological Soc. Am. 1966. P. 107—173.
8. Drickamer H. G., Lynch R. W., Clendenen R. L. e. a.//Solid State Phys. 1966. Vol. 19. P. 135—228.
9. Андерсон О.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ. М.: Мир. 1968. Т. III Ч. Б. Динамика решетки.
10. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: Справочник. Киев: Наукова думка. 1982.
11. Vaidya S. N., Kennedy G. C.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. № 10. P. 2329—2345.
12. Gschneidner K., Jr.//Solid State Phys., 1964. Vol. 16. P. 275—426.
13. Anderson M. S., Swenson C. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1975. Vol. 36. № 3. P. 145—162.
14. Vaidya S. N., Kennedy G. C.//Ibid. 1972. Vol. 33. № 7. P. 1377—1389.
15. Anderson M. S., Swenson C. A.//Phys. Rev. B. 1974. Vol. 10. № 12. P. 5184—5191.
16. Udovichenko B. G., Manzhelii V. G.//J. Low Temp. Phys. 1970. Vol. 3. № 4. P. 429—438.
17. Reynolds C. L., Jr., Barker R. E., Jr.//J. Chem. Phys. 1974. Vol. 61. № 7(1). P. 2548—2549.
18. McSkimin H. J., Jayaraman A., Andreatch P., Jr.//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. № 5. P. 2362—2364.
19. Barsch G. R., Chang Z. P.//Phys. Stat. Solidi. 1967. Vol. 19. № 1. P. 139—151.
20. Vaidya S. N., Getting I. C., Kennedy G. C.//J. Phys. Chem. Solids. 1971. Vol. 32. № 11. P. 2545—2566.
21. Stewart J. W.//Ibid. 1968. Vol. 29. № 4. P. 641—651.
22. Vaidya S. N., Kennedy G. C.//Ibid. 1971. Vol. 32. № 5. P. 951—964.
23. Gust W. H., Holt A. C., Royce E. B.//J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. № 2. P. 550—560.
24. Champhousen D. L. e. a.//Phys. Rev. Lett. 1971. Vol. 26. № 4. P. 184—188.
25. Chang Z. P., Graham E. K.//J. Phys. Chem. Solids. 1977. Vol. 38. № 12. P. 1355—1362.
26. Wong C., Shuele D. E.//Ibid. 1968. Vol. 29. № 8. P. 1309—1330.
27. Cline C. F., Stephens D. R.//J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. № 9. P. 2869—2873.
28. Францевич И. Н., Гнесин Г. Г., Курдюмов А. В. и др. Сверхтвердые материалы/Под ред. И. Н. Францевича. Киев: Наукова думка. 1980.
29. Garcia P. F., Barsch G. R.//Phys. Rev. B. 1973. Vol. 8. № 6. P. 2505—2515.
30. Garcia P. F., Barsch G. R.//Phys. Stat. Solidi. B. 1973. Vol. 59. № 2. P. 595—606.
31. Akgöz Y. C., Farley J. M., Saunders G. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34. № 2. P. 141—149.
32. Holzapfel W., Drickamer H. G.//J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. № 10. P. 4798—4800.
33. Brown H. L. e. a.//Ibid. 1966. Vol. 45. № 2. P. 547—549.
34. McSkimin H. J., Jayaraman A., Andreatch P., Jr. e. a.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 9. P. 4127—4128.
35. Weil R., Groves W. O.//Ibid. 1968. Vol. 39. № 9. P. 4049—4051.
36. Jorgensen J. D.//Ibid. 1978. Vol. 49. № 11. P. 5473—5478.
37. Wang H., Simmons G.//J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78. № 8. P. 1262—1273.
38. Michel D. J.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 12. P. 5547—5548.
39. Jayaraman A. e. a.//Phys. Rev. B., 1974. Vol. 9. № 6. P. 2513—2520.
40. Takahashi T. e. a.//J. Geophys. Res. 1968. Vol. 73. № 14. P. 4717—4725.
41. Chandrasekhar B. S., Rayne J. A.//Phys. Rev. 1961. Vol. 124. № 4. P. 1011—1014.
42. Jayaraman A.//Rev. Mod. Phys. 1983. Vol. 55. № 1. P. 65—108.
43. Banus M. D., Lavine M. C.//High Temp. — High Press. 1969. Vol. 1. № 3. P. 269—273.
44. Sawaoka A. e. a.//Japan. J. Appl. Phys. 1974. Vol. 13. № 3. P. 579.
45. Gerlich D. e. a.//Phys. Rev. B. 1984. Vol. 29. № 4. P. 2142—2147.
46. Chattopadhyay T. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1983. Vol. 44. № 7. P. 699—700.
47. Gerlich D., Smith C. S.//Ibid. 1974. Vol. 35. № 12. P. 1587—1592.
48. Stephens D. P., Lilley E. M.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 1. P. 177—180.
49. Cheng C. H.//Phys. Chem. Solids. 1967. Vol. 28. № 3. P. 413—416.
50. Davis L. C. e. a.//Ibid. 1967. Vol. 28. № 3. P. 439—447.
51. Завадский Э. А., Каменев В. И.//Физика и техника высоких давлений. Киев: Наукова думка. 1980. № 1. С. 29—42.
52. Manghani M. H. e. a.//Phys. Stat. Solidi a. 1974. Vol. 25. № 1. P. 69—78.
53. Soga N. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34. № 12. P. 2143—2148.
54. Chattopadhyay T. e. a.//Ibid. 1982. Vol. 43. № 9. P. 919—923.
55. Hazen R. M., Finger L. W.//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. № 11. P. 6826—6828.
56. Wu A. Y.//Phys. Lett. A. 1977. Vol. 60. № 3. P. 260—262.
57. Boyle W. F. e. a.//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 14. № 2. P. 526—530.
58. Peercy P. S. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1975. Vol. 36. № 10. P. 1123—1128.
59. Chang E., Graham E. K.//J. Geophys. Res. 1975. Vol. 80. № 17. P. 2595—2599.
60. Mullen M. E. e. a.//Phys. Rev. B. 1974. Vol. 10. № 1. P. 186—199.
61. Tosi M. P.//Solid State Phys. 1964. Vol. 16. P. 1—120.
62. Lippmann G. e. a.//Phys. Stat. Solidi a. 1971. Vol. 6. № 2. K159—K161.
63. Edwards L. R., Lynch R. W.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. № 3. P. 573—574.
64. Lewis G. K. e. a.//J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45. № 2. P. 598—600.
65. Peercy P. S. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1975. Vol. 36. № 10. P. 1105—1122.
66. Banus M. D., Lavine M.//High Temp. — High Pres. 1970. Vol. 2. № 6. P. 671—679.
67. Benjamin T. M. e. a.//Ann. Rept. Dir. Geophys. Lab. 1980—1981. Washington D. C.: Carnegie Institution, s. a. P. 280—283.
68. Chattopadhyay T. e. a.//Phys. Rev. B. 1981. Vol. 23. № 6. P. 2471—2483.



69. Каменев В. И., Завадский Э. А.//Физика твердого тела. 1978. Т. 20. № 3. С. 933—935.
70. Bartholin H., Florence D., Parisot D. e. a.//Phys. Lett. A., 1977. Vol. 60. № 1. P. 47—49.
71. Ito T.//High Pressure Science and Technology. Ed. by K. D. Timmerhaus und M. S. Barber. N. Y., Lond.: Plenum Press. 1979. Vol. 1. P. 482—490.
72. Vařdy S. N., Kennedy G. C.//J. Chem. Phys. 1971. Vol. 55. № 3(1). P. 987—992.
73. Hamamsy M. E., Elnahwy S., Damask A. C. e. a.//Ibid. 1977. Vol. 67. № 12. P. 5501—5504.
74. Losty H. H. W.//Modern Aspects of Graphite Technology/Ed. by L. C. F. Blackman. Lond.: Academ. Press. 1970. P. 204.
75. Кабалкина С. С.//Докл. АН СССР. 1959. Т. 125. № 1. С. 114—117.
76. Кабалкина С. С. и др.//Там же. 1962. Т. 144. № 5. С. 1019—1021.
77. Кабалкина С. С., Верещагин Л. Ф.//Там же. 1960. Т. 134. № 2. С. 330—332.
78. Morosin B., Schriber J. E.//Solid Stat. Commun., 1972. Vol. 10. № 3. P. 249—251.
79. Верещагин Л. Ф., Кабалкина С. С., Троицкая З. В.//Докл. АН СССР. 1964. Т. 158. № 5. С. 1061—1063.
80. Кабалкина С. С., Троицкая З. В.//Там же, 1963. Т. 151. № 5. С. 1068—1070.
81. Iwata N., Okamoto T.//Japan. J. Appl. Phys. 1975. Vol. 14. № 2. P. 248—252.
82. Pace N. G. e. a.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. № 7. P. 1467—1476.
83. Кабалкина С. С., Верещагин Л. Ф.//Докл. АН СССР. 1962. Т. 143. № 4. С. 818—821.
84. Верещагин Л. Ф. и др.//Там же, 1965. Т. 165. № 2. С. 297—298.
85. Clarke R.//Solid Stat. Commun. 1978. Vol. 25. № 5. P. 333—336.
86. Колобянина Т. Н. и др.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1970. Т. 59. № 4(10). С. 1146—1155.
87. Olinger B., Jamieson J. C.//High Temp. — High Press. 1973. Vol. 5. № 2. P. 123—131.
88. Worlton T. G., Cartz L., Niravath A.//Ibid. 1972. Vol. 4. № 4. P. 463—469.
89. Handbook of Chemistry and Physics//37-th ed./Ed. by Ch. D. Hodgman. Cleveland; Ohio: Chem. Rubber Publ. Co. 1955—1956.
90. Масленикова В. Я., Никифорова М. Б.//Докл. АН СССР. 1983. Т. 273. № 4. С. 871—873.
91. Техническая энциклопедия/Под ред. Л. К. Мартенса, М.: Советская энциклопедия. 1930. Т. 5.
92. Гайворонский А. Т., Яковлев Ю. А.//Физика и техника высоких давлений. Киев: Наукова Думка. 1982. № 7. С. 69—74.
93. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных: Пер. с англ./Под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз, 1962.
94. Атаиов Ю. А., Борзунов В. А., Разумихин В. Н./Исследования в области высоких давлений/Под ред. Е. В. Золотых. М.: Изд-во стандартов. 1969. Вып. 104(164). С. 99—102.
95. Chen C. T., Fine R. A., Millero F. J.//J. Phys. Chem. 1977. Vol. 66. № 5. P. 2142—2144.
96. McAlister S. P. e. a.//Canad. J. Phys. 1974. Vol. 52. № 19. P. 1847—1851.
97. Вилсон Д. Р. Структура жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1972.
98. McAlister S. P., Crozier E. D.//Solid State Commun. 1981. Vol. 40. № 4. P. 375—378.
99. Cleaver B., Spencer E. D.//High Temp. — High Press. 1975. Vol. 7. № 5. P. 539—549.
100. Cleaver B., Zani P.//Ibid. 1972. Vol. 4. № 4. P. 463—469.

## ГЛАВА 5 ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ

А. П. Бабичев

### 5.1. ВВЕДЕНИЕ

1. Приведенные значения плотности соответствуют плотности веществ при температуре 20 °С и атмосферном давлении, за исключением тех случаев, когда в скобках указана другая температура.

2. Значения плотности азота, брома, водорода, йода, кислорода, фосфора, фтора и хлора приведены для их естественного молекулярного состояния.

3. Приняты следующие сокращения: ам. — аморфный, б. — белый; г. — голубой, гекс. — гексагональный, ж. — желтый, ждк. — жидкий, з. — зеленый, к. — коричневый, куб. — кубический, крст. — кристаллический, мон. — моноклинный, ор. — оранжевый, ромб. — ромбический, с. — синий, сер. — серый, сткл. — стекловидный,

тв. — твердый, триг. — тригональный, трикл. — триклинный, ф. — фиолетовый, ч. — черный, R — радиоактивный.

4. В § 5.2 для ряда элементов приведены в круглых скобках приближенные значения атомной массы наиболее стабильного изотопа.

В § 5.3 римскими цифрами в круглых скобках указана — степень окисленности элемента в данном соединении.

5. За более детальными сведениями рекомендуем обращаться к следующим изданиям: элементы [1, 2], неорганические вещества [3], органические вещества [7], жидкости [12], ртуть и вода при различной температуре [12], пластмассы, сплавы, минералы, дерево и другие твердые вещества [8, 9, 14].

| Элемент                                     | Атомная масса, а. е. м. | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$                             |
|---------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $^{14}\text{N}$ Азот                        | 14,0067                 | $1,2506 \cdot 10^{-3}$<br>0,808<br>(—195,8 °C) ждк.          |
| $^{85}\text{As}$ Актиний                    | (227)                   | 10,07                                                        |
| $^{13}\text{Al}$ Алюминий                   | 26,98154                | 2,6889                                                       |
| $^{95}\text{Am}$ Америций                   | (243)                   | 13,67                                                        |
| $^{18}\text{Ar}$ Аргон                      | 39,948                  | $1,7837 \cdot 10^{-3}$<br>1,40<br>(—186 °C) ждк.             |
| $^{85}\text{At}$ Астат                      | (210)                   | —                                                            |
| $^{56}\text{Ba}$ Барий                      | 137,33                  | 3,594                                                        |
| $^4\text{Be}$ Бериллий                      | 9,01218                 | 1,848                                                        |
| $^{97}\text{Bk}$ Берклий                    | (247)                   | 14,78                                                        |
| $^5\text{B}$ Бор                            | 10,811 [5]              | 2,34 крст.<br>2,37 ам.                                       |
| $^{35}\text{Br}$ Бром                       | 79,904                  | 3,119                                                        |
| $^{23}\text{V}$ Ванадий                     | 50,9415                 | 5,96                                                         |
| $^{83}\text{Bi}$ Висмут                     | 208,9804                | 9,78                                                         |
| $^1\text{H}$ Водород                        | 1,00794 [7]             | $8,988 \cdot 10^{-5}$<br>0,0708<br>(—252,8 °C) ждк.          |
| $^{74}\text{W}$ Вольфрам                    | 183,85 [3]              | 19,35                                                        |
| $^{64}\text{Gd}$ Гадолиний                  | 157,25 [3]              | 7,895                                                        |
| $^{31}\text{Ga}$ Галлий                     | 69,723 [4]              | 5,904<br>(29,6 °C) тв.                                       |
| $^{72}\text{Hf}$ Гафний                     | 178,49 [3]              | 6,095<br>(29,8 °C) ждк.                                      |
| $^2\text{He}$ Гелий                         | 4,00602 [2]             | 13,31<br>$1,785 \cdot 10^{-4}$<br>0,1221<br>(—268,9 °C) ждк. |
| $^{32}\text{Ge}$ Германий                   | 72,59 [3]               | 5,323 (25 °C)                                                |
| $^{67}\text{Ho}$ Гольмий                    | 164,9304                | 8,795 (25 °C)                                                |
| $^{96}\text{Dy}$ Диспрозий                  | 162,50 [3]              | 8,550 (25 °C)                                                |
| $^{63}\text{Eu}$ Европий                    | 151,96                  | 5,243 (25 °C)                                                |
| $^{26}\text{Fe}$ Железо                     | 55,847 [3]              | 7,874                                                        |
| $^{79}\text{Au}$ Золото                     | 196,9665                | 19,32                                                        |
| $^{49}\text{In}$ Индий                      | 114,82                  | 7,31                                                         |
| $^{53}\text{I}$ Иод                         | 126,9045                | 4,93                                                         |
| $^{71}\text{Ir}$ Иридий                     | 192,22 [3]              | 22,42 (17 °C)                                                |
| $^{70}\text{Yb}$ Иттербий ( $\alpha$ -фаза) | 173,04 [3]              | 6,965                                                        |
| $^{39}\text{Y}$ Иттрий                      | 88,9058                 | 4,469 (25 °C)                                                |
| $^{48}\text{Cd}$ Кадмий                     | 112,41                  | 8,65                                                         |
| $^{19}\text{K}$ Калий                       | 39,0983                 | 0,862                                                        |
| $^{98}\text{Cf}$ Калифорний                 | (251)                   | —                                                            |
| $^{26}\text{Ca}$ Кальций                    | 40,078 [4]              | 1,55                                                         |
| $^8\text{O}$ Кислород                       | 15,9994 [3]             | $1,429 \cdot 10^{-3}$<br>1,14<br>(—182,9 °C) ждк.            |
| $^{27}\text{Co}$ Кобальт                    | 58,9332                 | 8,90                                                         |
| $^{14}\text{Si}$ Кремний                    | 28,0855 [3]             | 2,33<br>(25 °C) крст.<br>2,0 (25 °C) ам.                     |
| $^{36}\text{Kr}$ Криптон                    | 83,80                   | $3,733 \cdot 10^{-3}$<br>2,155<br>(—153,2 °C) ждк.           |
| $^{54}\text{Xe}$ Ксенон                     | 131,29 [3]              | $5,8971 \cdot 10^{-3}$<br>3,52<br>(—109 °C) ждк.             |
| $^{96}\text{Sm}$ Кюрий                      | (247)                   | 13,51 расч.                                                  |
| $^{57}\text{La}$ Лантан                     | 138,9055 [3]            | 6,145 (25 °C)                                                |
| $^3\text{Li}$ Литий                         | 6,941 [2]               | 0,534                                                        |

| Элемент                                                            | Атомная масса, а. е. м. | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$          |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|
| $^{71}\text{Lu}$ Лютеций                                           | 174,967                 | 9,840                                     |
| $^{12}\text{Mg}$ Магний                                            | 24,305                  | 1,738                                     |
| $^{25}\text{Mn}$ Марганец ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ -фазы) | 54,9380                 | 7,21—7,44                                 |
| $^{29}\text{Cu}$ Медь                                              | 63,546 [3]              | 8,96                                      |
| $^{101}\text{Md}$ Менделевий                                       | (258)                   | —                                         |
| $^{42}\text{Mo}$ Молибден                                          | 95,94                   | 10,22                                     |
| $^{33}\text{As}$ Мышьяк (с., гекс., $\alpha$ -фаза)                | 74,9216                 | 5,73                                      |
| $^{11}\text{Na}$ Натрий (ч., ам.)                                  | 22,98977                | 4,7—5,1                                   |
| $^{60}\text{Nd}$ Неодим (ж., ромб., $\gamma$ -фаза)                | 144,24 [3]              | 1,97                                      |
| $^{10}\text{Ne}$ Неон                                              | 20,179                  | 0,971                                     |
| $^{93}\text{Np}$ Нептуний                                          | 237,0482                | 7,007                                     |
| $^{28}\text{Ni}$ Никель                                            | 58,69                   | 6,80                                      |
| $^{41}\text{Nb}$ Ниобий                                            | 92,9064                 | $9,0035 \cdot 10^{-4}$                    |
| $^{50}\text{Sn}$ Олово (с., куб., $\alpha$ -фаза)                  | 118,710 [7]             | 2,205<br>(—246 °C) ждк.                   |
| $^{76}\text{Os}$ Осмий (б., тетра., $\beta$ -фаза)                 | 190,2                   | 20,25                                     |
| $^{46}\text{Pd}$ Палладий                                          | 106,42                  | 8,91                                      |
| $^{78}\text{Pt}$ Платина                                           | 195,08 [3]              | 8,57                                      |
| $^{94}\text{Pu}$ Плутоний ( $\alpha$ -фаза)                        | (244)                   | 5,85                                      |
| $^{84}\text{Po}$ Полоний (куб., $\alpha$ -фаза)                    | (209)                   | 7,29                                      |
| $^{59}\text{Pr}$ Празеодим (гекс., $\beta$ -фаза)                  | 140,9077                | 22,57                                     |
| $^{61}\text{Pm}$ Прометий (гекс., $\alpha$ -фаза)                  | (145)                   | 12,02                                     |
| $^{91}\text{Pa}$ Протактиний (куб., $\beta$ -фаза)                 | 231,0359                | 21,45                                     |
| $^{88}\text{Ra}$ Радий                                             | 226,0254                | 19,84 (25 °C)                             |
| $^{86}\text{Rn}$ Радон                                             | (222)                   | 9,32                                      |
| $^{75}\text{Re}$ Рений                                             | 186,207                 | 9,4                                       |
| $^{45}\text{Rh}$ Родий                                             | 102,9055                | 6,773                                     |
| $^{80}\text{Hg}$ Ртуть                                             | 200,59 [3]              | 6,44                                      |
| $^{37}\text{Rb}$ Рубидий                                           | 85,4678 [3]             | 7,22 (25 °C)                              |
| $^{44}\text{Ru}$ Рутений                                           | 101,07 [2]              | 15,37 расч.                               |
| $^{62}\text{Sm}$ Самарий (гекс., $\alpha$ -фаза)                   | 150,36 [3]              | 5—6                                       |
| $^{82}\text{Pb}$ Свинец (куб., $\beta$ -фаза)                      | 207,2                   | $9,73 \cdot 10^{-3}$<br>4,4 (—62 °C) ждк. |

| Элемент                                                                                     | Атомная масса, а.е.м. | Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>           | Название                                                                                                                                                                                                                                                        | Формула                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <sup>34</sup> Se Селен<br>(ч., сткл.)<br>(к., мон., β-фаза)<br>(с., гекс., α-фаза)<br>(ам.) | 78,96 [3]             | 4,28<br>4,46<br>4,79<br>4,82                  | Азот<br>(I) оксид<br>(II) оксид<br>(III) оксид<br>(IV) оксид<br>(V) оксид<br>ди-, сульфид,<br>тетра-<br>тетра-, сульфид,<br>тетра-<br>фторид<br>хлорид<br>Азотистоводородная кислота<br>Азотная кислота<br>Аммиак<br>Гидразин<br>Нитрил-фторид<br>Нитрил хлорид | N <sub>2</sub> O<br>NO<br>N <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>NO <sub>2</sub><br>N <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>N <sub>2</sub> S <sub>4</sub><br>N <sub>4</sub> S <sub>4</sub><br>NF <sub>3</sub><br>NCl <sub>3</sub><br>HN <sub>3</sub><br>HNO <sub>3</sub><br>NH <sub>3</sub><br>N <sub>2</sub> H <sub>4</sub><br>NO <sub>2</sub> F<br>NO <sub>2</sub> Cl                                        | 1,978·10 <sup>-3</sup><br>1,340·10 <sup>-3</sup><br>1,45 (2° C)<br>1,49 (0° C) ждк.<br>1,64<br>1,90<br>2,22 (15° C)<br>1,54 (—129° C) ждк.<br>1,653<br>1,09<br>1,513<br>0,771·10 <sup>-3</sup><br>1,01<br>2,90·10 <sup>-3</sup><br>2,57·10 <sup>-3</sup> |
| <sup>16</sup> S Сера<br>(ж., ам., γ-фаза)<br>(ж., мон., β-фаза)<br>(ж., ромб., α-фаза)      | 32,066 [6]            | 1,92<br>1,96<br>2,07                          | Алюминий<br>борид, ди-<br>бромид<br>гидроксид<br>гидроксид оксид<br>иодид<br>карбид<br>нитрат<br>нитрид<br>оксид (корунд)<br>сульфат<br>сульфид<br>фосфат, орто-<br>фторид<br>хлорид                                                                            | AlB <sub>2</sub><br>AlBr <sub>3</sub><br>Al(OH) <sub>3</sub><br>AlO(OH)<br>AlI <sub>3</sub><br>Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub><br>Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O<br>AlN<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub><br>Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub><br>AlPO <sub>4</sub><br>AlF <sub>3</sub><br>AlCl <sub>3</sub>                 | 3,19<br>3,01 (25° C)<br>2,42<br>3,01<br>3,95<br>2,36<br>1,72<br>3,13<br>3,97<br>2,71<br>2,02 (13° C)<br>2,57<br>3,07<br>2,44 (25° C)                                                                                                                     |
| <sup>47</sup> Ag Серебро                                                                    | 107,8682 [3]          | 10,50                                         | Америций<br>(IV) оксид                                                                                                                                                                                                                                          | AmO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 11,7                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <sup>21</sup> Sc Скандий                                                                    | 44,95591 [1]          | 2,989 (25° C)                                 | Аммоний<br>амид<br>бромид<br>иодат<br>иодид<br>нитрат<br>нитрит<br>сульфат<br>сульфид, гидро-<br>фосфат, гидро-<br>фторид<br>хлорат<br>хлорид                                                                                                                   | NH <sub>4</sub> N <sub>3</sub><br>NH <sub>4</sub> Br<br>NH <sub>4</sub> IO <sub>3</sub><br>NH <sub>4</sub> I<br>NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub><br>NH <sub>4</sub> NO <sub>2</sub><br>(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>(NH <sub>4</sub> ) HS<br>(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub><br>NH <sub>4</sub> F<br>NH <sub>4</sub> ClO <sub>3</sub><br>NH <sub>4</sub> Cl | 1,346<br>2,40<br>3,31<br>2,51<br>1,725<br>1,69<br>1,77<br>1,17<br>1,62<br>1,015<br>1,80<br>1,53                                                                                                                                                          |
| <sup>38</sup> Sr Стронций<br>(куб., α-фаза)                                                 | 87,62                 | 2,63                                          | Барий<br>азид<br>борид, гекса-<br>бромид<br>гидрид<br>иодат<br>иодид<br>карбид, ди-<br>карбонат (γ-фаза)                                                                                                                                                        | Ba(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br>BaB <sub>6</sub><br>BaBr <sub>2</sub><br>BaH <sub>2</sub><br>Ba(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br>BaI <sub>2</sub><br>BaC <sub>2</sub><br>BaCO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                   | 2,936<br>4,36 (16° C)<br>4,781 (24° C)<br>4,21<br>5,00<br>4,92<br>3,75<br>4,43                                                                                                                                                                           |
| <sup>51</sup> Sb Сурьма                                                                     | 121,75 [3]            | 6,691                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>81</sup> Tl Таллий<br>(гекс., α-фаза)                                                  | 204,383               | 11,85                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>73</sup> Ta Тантал                                                                     | 180,9479              | 16,654                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>52</sup> Te Теллур                                                                     | 127,60 [3]            | 6,24 крст.<br>6,00 ам.                        |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>65</sup> Tb Тербий                                                                     | 158,9254              | 8,272                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>43</sup> Tc Технеций                                                                   | 98,9062               | 11,49                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>22</sup> Ti Титан<br>(гекс., α-фаза)                                                   | 47,88 [3]             | 4,505                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>90</sup> Th Торий                                                                      | 232,0381              | 11,72                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>69</sup> Tm Тулий                                                                      | 168,9342              | 9,321 (25° C)                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>6</sup> C Углерод<br>(графит)<br>(алмаз)                                               |                       | 1,8—2,1 ам.<br>1,9—2,3<br>3,15—3,53           |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>92</sup> U Уран (ромб., α-фаза)                                                        | 238,0289              | 19,040                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>100</sup> Fm Фермий                                                                    | (257)                 | —                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>15</sup> P Фосфор<br>(б., куб.)<br>(к., трикл.)<br>(ч., ромб.)                         | 30,97376              | 1,82<br>2,0—2,4<br>2,25—2,69                  |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>87</sup> Fr Франций                                                                    | (223)                 | —                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>9</sup> F Фтор                                                                         | 18,998403             | 1,696·10 <sup>-3</sup>                        |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>17</sup> Cl Хлор                                                                       | 35,453                | 3,214·10 <sup>-3</sup><br>1,557 (—35° C) ждк. |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>24</sup> Cr Хром                                                                       | 51,9961 [6]           | 7,18—7,20                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>55</sup> Cs Цезий                                                                      | 132,9054              | 1,873                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>58</sup> Ce Церий (гекс., γ-фаза)                                                      | 140,12                | 6,77                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>30</sup> Zn Цинк                                                                       | 65,39 [2]             | 7,133                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>40</sup> Zr Цирконий (гекс., α-фаза)                                                   | 91,224 [2]            | 6,45                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>99</sup> Es Эйнштейний                                                                 | (254)                 | —                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <sup>68</sup> Er Эрбий                                                                      | 167,26 [3]            | 9,066 (25° C)                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                          |

| Название           | Формула                                              | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> | Название                  | Формула                                              | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| нитрат             | Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                    | 3,24                                            | (III) фторид              | VF <sub>3</sub>                                      | 3,36                                            |
| нитрид             | Ba <sub>3</sub> N <sub>2</sub>                       | 4,78 (25° C)                                    | (IV) фторид               | VF <sub>4</sub>                                      | 2,975                                           |
| оксид              | BaO                                                  | 5,72                                            | (V) фторид                | VF <sub>5</sub>                                      | 2,18                                            |
| пероксид           | BaO <sub>2</sub>                                     | 4,96                                            | (II) хлорид               | VCl <sub>2</sub>                                     | 3,23                                            |
| сульфат            | BaSO <sub>4</sub>                                    | 4,50 (15° C)                                    | (III) хлорид              | VCl <sub>3</sub>                                     | 3,00                                            |
| сульфид            | BaS                                                  | 4,25 (15° C)                                    | (IV) хлорид               | VCl <sub>4</sub>                                     | 1,87                                            |
| фторид             | BaF <sub>2</sub>                                     | 4,83                                            | <b>Висмут</b>             |                                                      |                                                 |
| хлорид             | BaCl <sub>2</sub>                                    | 3,92                                            | (III) бромид              | BiBr <sub>3</sub>                                    | 5,60                                            |
| <b>Бериллий</b>    |                                                      |                                                 | гидроксид                 | Bi(OH) <sub>3</sub>                                  | 4,36                                            |
| бромид             | BeBr <sub>2</sub>                                    | 3,47                                            | (III) иодид               | BiI <sub>3</sub>                                     | 5,64                                            |
| гидроксид          | Be(OH) <sub>2</sub>                                  | 1,909                                           | иодид оксид               | BiIO                                                 | 7,92                                            |
| иодид              | BeI <sub>2</sub>                                     | 4,33 (25° C)                                    | (II) оксид                | BiO                                                  | 7,15—7,30                                       |
| карбид             | Be <sub>2</sub> C                                    | 1,90 (15° C)                                    | (III) оксид               | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 8,9                                             |
| нитрат             | Be(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O | 1,56                                            | (III, V) оксид            | Bi <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O    | 5,6                                             |
| нитрид             | Be <sub>3</sub> N <sub>2</sub>                       | 2,71                                            | (V) оксид                 | Bi <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                       | 5,10                                            |
| оксид              | BeO                                                  | 3,01                                            | оксид фторид              | BiFO                                                 | 7,5                                             |
| сульфат            | BeSO <sub>4</sub>                                    | 2,44                                            | оксид хлорид              | BiClO                                                | 7,72 (15° C)                                    |
| сульфид            | BeS                                                  | 2,36                                            | сульфат                   | Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>      | 5,08 (15° C)                                    |
| фторид             | BeF <sub>2</sub>                                     | 1,99 (25° C)                                    | (II) сульфид              | BiS                                                  | ~7,7                                            |
| хлорид             | BeCl <sub>2</sub>                                    | 1,90 (25° C)                                    | (III) сульфид             | Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                       | 7,6                                             |
| <b>Бор</b>         |                                                      |                                                 | фосфат, орто-             | BiPO <sub>4</sub>                                    | 6,32 (15° C)                                    |
| бромид             | BBr <sub>3</sub>                                     | 2,65                                            | (III) фторид              | BiF <sub>3</sub>                                     | 8,75                                            |
| иодид              | BI <sub>3</sub>                                      | 3,35 (50° C)                                    | (III) хлорид              | BiCl <sub>3</sub>                                    | 4,75                                            |
| тетра-, карбид     | B <sub>4</sub> C                                     | 2,52                                            | Висмутовая кис-<br>лота   | Bi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ·nH <sub>2</sub> O    | 5,75                                            |
| нитрид             | BN                                                   | 2,34                                            | <b>Водород</b>            |                                                      |                                                 |
| оксид              | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 1,844 крст.                                     | бромид                    | HBr                                                  | 2,16 (—68° C)                                   |
| ди-, сульфид,      | B <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                        | 1,55                                            | иодид                     | HI                                                   | 2,80 (—35° C)                                   |
| три-               |                                                      |                                                 | селенид                   | H <sub>2</sub> Se                                    | 2,12 (—42° C)                                   |
| фторид             | BF <sub>3</sub>                                      | 2,99·10 <sup>-3</sup>                           | сульфид                   | H <sub>2</sub> S                                     | 0,96 (—60° C)                                   |
| хлорид             | BCl <sub>3</sub>                                     | 1,434 (0° C)                                    | теллурид                  | H <sub>2</sub> Te                                    | 2,57 (—20° C)                                   |
| Борная кислота,    | HBO <sub>2</sub>                                     | 2,49                                            | фторид                    | HF                                                   | 0,991 (19,4° C)                                 |
| мета-              |                                                      |                                                 | хлорид                    | HCl                                                  | 1,19 (—85°)                                     |
| Борная кислота,    | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                       | 1,435 (15° C)                                   | Вода                      | H <sub>2</sub> O                                     | 1,0000 (4° C)                                   |
| орто-              |                                                      |                                                 | Вода тяжелая              | D <sub>2</sub> O                                     | 1,104                                           |
| Гексаборан         | B <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                       | 0,69 (0° C)                                     | Пероксид водорода         | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                        | 1,442                                           |
| Декаборан          | B <sub>10</sub> H <sub>14</sub>                      | 0,94 (25° C)                                    | (перекись водорода)       |                                                      |                                                 |
| Диборан            | B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                        | 0,447 (—112° C)<br>ж.дк.                        | <b>Вольфрам</b>           |                                                      |                                                 |
| Пентаборан         | B <sub>5</sub> H <sub>9</sub>                        | 0,66 (0° C)                                     | борид                     | W <sub>2</sub> B                                     | 17,7                                            |
| Тетраборан         | B <sub>4</sub> H <sub>10</sub>                       | 0,56 (—35° C) ж.дк.                             | борид, ди-                | WB <sub>2</sub>                                      | 10,77                                           |
| <b>Бром</b>        |                                                      |                                                 | (VI) бромид               | WBr <sub>6</sub>                                     | 6,9                                             |
| фторид, три-       | BrF <sub>3</sub>                                     | 2,49                                            | (II) иодид                | WI <sub>2</sub>                                      | 6,9                                             |
| фторид, пента-     | BrF <sub>5</sub>                                     | 2,47 (25° C) ж.дк.                              | (IV) иодид                | WI <sub>4</sub>                                      | 5,2 (18° C)                                     |
| Бромоводород       | HBr                                                  | 3,645·10 <sup>-3</sup>                          | Карбид                    | WC                                                   | 15,7                                            |
| <b>Ванадий</b>     |                                                      |                                                 | ди-, карбид               | W <sub>2</sub> C                                     | 16,06—17,3                                      |
| борид              | VB <sub>2</sub>                                      | 5,10                                            | карбонил, гекса           | W(CO) <sub>6</sub>                                   | 2,65                                            |
| бромид             | VBr <sub>3</sub>                                     | 4,00                                            | (IV) оксид                | WO <sub>2</sub>                                      | 12,11                                           |
| иодид              | VI <sub>2</sub>                                      | 5,44                                            | (VI) оксид                | WO <sub>3</sub>                                      | 7,16                                            |
| карбид             | VC                                                   | 5,77                                            | силицид, ди-              | WSi <sub>2</sub>                                     | 9,4                                             |
| нитрид             | VN                                                   | 6,13                                            | сульфид, ди-              | WS <sub>2</sub>                                      | 7,5 (10° C)                                     |
| (II) оксид         | VO                                                   | 5,76                                            | (VI) фторид               | WF <sub>6</sub>                                      | 3,44 (15° C) ж.дк                               |
| (III) оксид        | V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 4,87                                            | (V) хлорид                | WCl <sub>5</sub>                                     | 3,875                                           |
| (IV) оксид         | VO <sub>2</sub>                                      | 4,34                                            | (VI) хлорид               | WCl <sub>6</sub>                                     | 3,52                                            |
| (V) оксид          | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                        | 3,36                                            | Вольфрамовая кис-<br>лота | H <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>                       | 5,5                                             |
| оксид фторид,      | VF <sub>3</sub> O                                    | 2,46 (19° C)                                    | <b>Гадолиний</b>          |                                                      |                                                 |
| три-               |                                                      |                                                 | бромид                    | GdBr <sub>3</sub>                                    | 4,57                                            |
| оксид хлорид, три- | VCl <sub>3</sub> O                                   | 1,83                                            | иодид                     | GdI <sub>3</sub>                                     | 3,14                                            |
| (II) сульфид       | VS                                                   | 4,20                                            | нитрат                    | Gd(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O | 2,33                                            |
| (III) сульфид      | V <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                        | 4,72                                            |                           |                                                      |                                                 |
| (V) сульфид        | V <sub>2</sub> S <sub>5</sub>                        | 3,0                                             |                           |                                                      |                                                 |

Продолжение табл.5.3

| Название         | Формула                           | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|
| оксид            | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 7,41 (15° C)                                    |
| сульфат          | Gd(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 4,14                                            |
| сульфид          | Gd <sub>2</sub> S <sub>3</sub>    | 6,15                                            |
| фторид           | GdF <sub>3</sub>                  | 7,05                                            |
| хлорид           | GdCl <sub>3</sub>                 | 4,52 (0° C)                                     |
| <b>Галлий</b>    |                                   |                                                 |
| (III) арсенид    | GaAs                              | 5,35                                            |
| (III) бромид     | GaBr <sub>3</sub>                 | 3,69 (25° C)                                    |
| (III) иодид      | GaI <sub>3</sub>                  | 4,15 (25° C)                                    |
| (I) оксид        | Ga <sub>2</sub> O                 | 4,77 (25° C)                                    |
| (III) оксид      | Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 5,88                                            |
| (α-фаза)         |                                   | 6,48                                            |
| (β-фаза)         |                                   | 4,2                                             |
| (I) сульфид      | Ga <sub>2</sub> S                 | 3,65 (25° C)                                    |
| (III) сульфид    | Ga <sub>2</sub> S <sub>3</sub>    | 4,47                                            |
| (III) фторид     | GaF <sub>3</sub>                  | 2,47 (25° C)                                    |
| (III) хлорид     | GaCl <sub>3</sub>                 |                                                 |
| <b>Гафний</b>    |                                   |                                                 |
| карбид           | HfC                               | 12,7                                            |
| нитрид           | HfN                               | 13,9                                            |
| оксид            | HfO <sub>2</sub>                  | 9,68                                            |
| сульфид          | HfS <sub>2</sub>                  | 6,0                                             |
| <b>Германий</b>  |                                   |                                                 |
| (IV) бромид      | GeBr <sub>4</sub>                 | 3,13 (29° C)                                    |
| (II) иодид       | GeI <sub>2</sub>                  | 5,37                                            |
| (IV) иодид       | GeI <sub>4</sub>                  | 4,32 (25° C)                                    |
| (IV) нитрид      | Ge <sub>3</sub> N <sub>4</sub>    | 5,25 (25° C)                                    |
| (II) оксид       | GeO                               | 1,83                                            |
| (IV) оксид       | GeO <sub>2</sub>                  | 6,239                                           |
| (α-фаза)         |                                   | 4,703                                           |
| (β-фаза)         |                                   | 4,01                                            |
| (II) сульфид     | GeS                               | 2,94 (14° C)                                    |
| (IV) сульфид     | GeS <sub>2</sub>                  | 6,65 · 10 <sup>-3</sup>                         |
| (IV) фторид      | GeF <sub>4</sub>                  | 1,87 (25° C)                                    |
| (IV) хлорид      | GeCl <sub>4</sub>                 | 3,42 · 10 <sup>-3</sup>                         |
| Герман           | GeH <sub>4</sub>                  | 1,98 (—100° C)                                  |
| Дигерман         | Ge <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 2,2                                             |
| Тригерман        | Ge <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    |                                                 |
| <b>Гольмий</b>   |                                   |                                                 |
| (III) бромид     | HoBr <sub>3</sub>                 | 4,86                                            |
| (III) иодид      | HoI <sub>3</sub>                  | 3,24                                            |
| оксид            | Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 8,35                                            |
| фторид           | HoF <sub>3</sub>                  | 7,83                                            |
| <b>Диспрозий</b> |                                   |                                                 |
| бромид           | DyBr <sub>3</sub>                 | 4,78                                            |
| иодид            | DyI <sub>3</sub>                  | 3,21                                            |
| оксид            | Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 7,81 (27° C)                                    |
| фторид           | DyF <sub>3</sub>                  | 7,46                                            |
| хлорид           | DyCl <sub>3</sub>                 | 3,67 (0° C)                                     |
| <b>Европий</b>   |                                   |                                                 |
| (III) бромид     | EuBr <sub>3</sub>                 | 5,40                                            |
| (II) иодид       | EuI <sub>2</sub>                  | 5,50                                            |
| (II) сульфат     | EuSO <sub>4</sub>                 | 4,99                                            |
| (III) оксид      | Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 7,42                                            |
| (II) фторид      | EuF <sub>2</sub>                  | 6,50                                            |
| (III) фторид     | EuF <sub>3</sub>                  | 6,79                                            |
| (III) хлорид     | EuCl <sub>3</sub>                 | 4,89                                            |

Продолжение табл. 5.3

| Название                        | Формула                                              | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Железо</b>                   |                                                      |                                                 |
| арсенид                         | FeAs                                                 | 7,83                                            |
| борид                           | FeB                                                  | 7,15                                            |
| (II) бромид                     | FeBr <sub>2</sub>                                    | 4,64                                            |
| (II) гидроксид                  | Fe(OH) <sub>2</sub>                                  | 3,4                                             |
| (III) гидроксид                 | Fe(OH) <sub>3</sub>                                  | 3,9                                             |
| (II) иодид                      | FeI <sub>2</sub>                                     | 5,31                                            |
| три-, карбид                    | Fe <sub>3</sub> C                                    | 7,4—7,67                                        |
| (II) карбонат                   | FeCO <sub>3</sub>                                    | 3,8—3,9                                         |
| карбонил, пента-                | Fe(CO) <sub>5</sub>                                  | 1,457                                           |
| карбонил, тетра-                | Fe(CO) <sub>4</sub>                                  | 2,00 (18° C)                                    |
| (III) нитрат                    | Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O | 1,68                                            |
| ди-, нитрид                     | Fe <sub>2</sub> N                                    | 6,35                                            |
| (II) оксид                      | FeO                                                  | 5,7                                             |
| (II, III) оксид                 | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                       | 5,18                                            |
| (магнетит)                      |                                                      |                                                 |
| (III) оксид (гематит)           | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 5,25                                            |
| силицид                         | FeSi                                                 | 6,1                                             |
| (II) сульфат (железный купорос) | FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | 1,90 (18° C)                                    |
| (III) сульфат                   | Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>      | 3,10                                            |
| (II) сульфид                    | FeS                                                  | 4,76                                            |
| (III) сульфид                   | Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                       | 4,3                                             |
| сульфид, ди-(α-фаза)            | FeS <sub>2</sub>                                     | 5,03                                            |
| фосфид                          | Fe <sub>3</sub> P                                    | 6,56                                            |
| (II) фторид                     | FeF <sub>2</sub>                                     | 4,09 (25° C)                                    |
| (III) фторид                    | FeF <sub>3</sub>                                     | 3,87                                            |
| (II) хлорид                     | FeCl <sub>2</sub>                                    | 2,98                                            |
| (III) хлорид                    | FeCl <sub>3</sub>                                    | 2,90 (25° C)                                    |
| <b>Золото</b>                   |                                                      |                                                 |
| (I) бромид                      | AuBr                                                 | 7,90                                            |
| (I) иодид                       | AuI                                                  | 8,25                                            |
| (III) сульфид                   | Au <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                       | 8,75                                            |
| (I) хлорид                      | AuCl                                                 | 7,4                                             |
| (III) хлорид                    | AuCl <sub>3</sub>                                    | 3,9                                             |
| <b>Индий</b>                    |                                                      |                                                 |
| (I) бромид                      | InBr                                                 | 4,98                                            |
| (III) бромид                    | InBr <sub>3</sub>                                    | 4,75                                            |
| (I) иодид                       | InI                                                  | 5,31                                            |
| (III) иодид                     | InI <sub>3</sub>                                     | 4,69                                            |
| (I) оксид                       | InO <sub>2</sub>                                     | 6,99 (25° C)                                    |
| (III) оксид                     | In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 7,18                                            |
| (III) сульфат                   | In <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>      | 3,44                                            |
| (I) сульфид                     | In <sub>2</sub> S                                    | 5,87 (25° C)                                    |
| (III) сульфид                   | In <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                       | 4,90                                            |
| (III) фторид                    | InF <sub>3</sub>                                     | 4,39 (25° C)                                    |
| (I) хлорид                      | InCl                                                 | 4,19                                            |
| (III) хлорид                    | InCl <sub>3</sub>                                    | 3,45                                            |
| <b>Йод</b>                      |                                                      |                                                 |
| (I) бромид                      | IBr                                                  | 4,42 (0° C)                                     |
| (IV) оксид                      | IO <sub>2</sub> или I <sub>2</sub> O <sub>4</sub>    | 4,2                                             |
| (V) оксид                       | I <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                        | 4,80                                            |
| фторид, пента-                  | IF <sub>5</sub>                                      | 3,5 ждк.                                        |
| фторид, гепта-                  | IF <sub>7</sub>                                      | 2,8 (6° C) ждк.                                 |
| хлорид                          | ICl                                                  |                                                 |
| (α-фаза)                        |                                                      | 3,18 (0° C)                                     |
| (β-фаза)                        |                                                      | 3,24 (34° C) ждк.                               |

Продолжение табл. 5.3

| Название                                | Формула                                              | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| хлорид, три-<br>Иодноватая кис-<br>лота | ICl <sub>3</sub><br>HIO <sub>3</sub>                 | 3,19<br>4,63 (0° C)                             |
| Иодоводород                             | HI                                                   | 5,789·10 <sup>-3</sup>                          |
| <b>Иридий</b>                           |                                                      |                                                 |
| (IV) оксид                              | IrO <sub>2</sub>                                     | 3,15                                            |
| (IV) сульфид                            | IrS <sub>2</sub>                                     | 8,43 (25° C)                                    |
| (VI) фторид                             | IrF <sub>6</sub>                                     | 6,0                                             |
| (III) хлорид                            | IrCl <sub>3</sub>                                    | 5,30                                            |
| <b>Иттербий</b>                         |                                                      |                                                 |
| (II) бромид                             | YbBr <sub>2</sub>                                    | 5,91 (25° C)                                    |
| (III) бромид                            | YbBr <sub>3</sub>                                    | 5,10                                            |
| (II) иодид                              | YbI <sub>2</sub>                                     | 5,40 (25° C)                                    |
| (III) иодид                             | YbI <sub>3</sub>                                     | 3,33                                            |
| (III) оксид                             | Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 9,17                                            |
| (III) сульфат                           | Yb <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>      | 3,79                                            |
| (III) фторид                            | YbF <sub>3</sub>                                     | 8,17                                            |
| (II) хлорид                             | YbCl <sub>2</sub>                                    | 5,08                                            |
| <b>Иттрий</b>                           |                                                      |                                                 |
| бромид                                  | YBr <sub>3</sub>                                     | 3,95                                            |
| карбид                                  | YC <sub>2</sub>                                      | 4,13                                            |
| нитрат                                  | Y(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O  | 2,68                                            |
| оксид (α-фаза)                          | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 4,84                                            |
| сульфат                                 | Y <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>       | 2,61                                            |
| фторид                                  | YF <sub>3</sub>                                      | 4,01                                            |
| хлорид                                  | YCl <sub>3</sub>                                     | 2,8                                             |
| <b>Кадмий</b>                           |                                                      |                                                 |
| бромид                                  | CdBr <sub>2</sub>                                    | 5,19                                            |
| гидроксид                               | Cd(OH) <sub>2</sub>                                  | 4,79 (15° C)                                    |
| иодид                                   | CdI <sub>2</sub>                                     | 5,67 (30°)                                      |
| карбонат                                | CdCO <sub>3</sub>                                    | 4,26 (4° C)                                     |
| нитрат                                  | Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O | 2,45 (17° C)                                    |
| (II) оксид                              | CdO                                                  | 8,15                                            |
| селенид                                 | CdSe                                                 | 5,81 (15° C)                                    |
| силикат, мета-                          | CdSiO <sub>3</sub>                                   | 4,93                                            |
| сульфат                                 | CdSO <sub>4</sub>                                    | 4,69                                            |
| сульфид                                 | CdS                                                  | 4,82                                            |
| теллурид                                | CdTe                                                 | 6,20 (15° C)                                    |
| фторид                                  | CdF <sub>2</sub>                                     | 6,64                                            |
| хлорид                                  | CdCl <sub>2</sub>                                    | 4,047                                           |
| <b>Калий</b>                            |                                                      |                                                 |
| азид                                    | KN <sub>3</sub>                                      | 2,04                                            |
| бромат                                  | KBrO <sub>3</sub>                                    | 3,24                                            |
| бромид                                  | KBr                                                  | 2,76                                            |
| гидрид                                  | KH                                                   | 1,47                                            |
| гидроксид                               | KOH                                                  | 2,04                                            |
| нодат                                   | KIO <sub>3</sub>                                     | 3,89                                            |
| иодид                                   | KI                                                   | 3,12                                            |
| карбонат (поташ)                        | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                       | 2,43                                            |
| нитрат (индийская<br>селитра)           | KNO <sub>3</sub>                                     | 2,11 (16° C)                                    |
| оксид                                   | K <sub>2</sub> O                                     | 2,32 (0° C)                                     |
| перидат                                 | KIO <sub>4</sub>                                     | 3,62                                            |
| перманганат                             | KMnO <sub>4</sub>                                    | 2,70                                            |
| пероксид                                | K <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                        | 2,18                                            |
| перхлорат                               | KClO <sub>4</sub>                                    | 2,52                                            |
| селенид                                 | K <sub>2</sub> Se                                    | 2,85 (15° C)                                    |
| сульфат                                 | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                       | 2,66                                            |

Продолжение табл. 5.3

| Название                                               | Формула                                                                                     | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| сульфат, гидро-<br>сульфид<br>супероксид<br>теллурид   | KHSO <sub>4</sub><br>K <sub>2</sub> S<br>K <sub>2</sub> O <sub>2</sub><br>K <sub>2</sub> Te | 2,32<br>1,81 (14° C)<br>2,14<br>2,51            |
| фосфат, орто-<br>фторид                                | K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub><br>KF                                                        | 2,26<br>2,48                                    |
| фторид, гидро-<br>хлорат                               | KHF <sub>2</sub><br>KClO <sub>3</sub>                                                       | 2,37<br>2,32                                    |
| хлорид<br>цианид                                       | KCl<br>KCN                                                                                  | 1,99<br>1,56                                    |
| <b>Кальций</b>                                         |                                                                                             |                                                 |
| борид, гекса-<br>бромат                                | CaB <sub>6</sub><br>Ca(BrO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O                    | 2,3<br>3,33                                     |
| бромид                                                 | CaBr <sub>2</sub>                                                                           | 3,35 (25° C)                                    |
| гидрид (α-фаза)                                        | CaH <sub>2</sub>                                                                            | 1,7                                             |
| гидроксид                                              | Ca(OH) <sub>2</sub>                                                                         | 2,24                                            |
| иодид                                                  | CaI <sub>2</sub>                                                                            | 3,96 (25° C)                                    |
| карбид                                                 | CaC <sub>2</sub>                                                                            | 2,22                                            |
| карбонат (аргонит)                                     | CaCO <sub>3</sub>                                                                           | 2,93                                            |
| карбонат (кальцит)                                     | CaCO <sub>3</sub>                                                                           | 2,71 (25° C)                                    |
| нитрат                                                 | Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                                           | 2,36                                            |
| нитрид                                                 | Ca <sub>3</sub> N <sub>2</sub>                                                              | 2,63 (17° C)                                    |
| оксалат                                                | CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                                             | 2,2 (4° C)                                      |
| оксид                                                  | CaO                                                                                         | 3,37                                            |
| селенид                                                | CaSe                                                                                        | 3,57                                            |
| силикат, мета-<br>(воластонит)<br>(α-фаза)<br>(β-фаза) | CaSiO <sub>3</sub>                                                                          | 2,5<br>2,90                                     |
| сульфат (ангидрит,<br>α-фаза)                          | CaSO <sub>4</sub>                                                                           | 2,90—2,99                                       |
| сульфат (гипс)                                         | CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                                        | 2,32                                            |
| сульфид (ольдга-<br>мит)                               | CaS                                                                                         | 2,18 (15° C)                                    |
| теллурид                                               | CaTe                                                                                        | 4,87                                            |
| фосфат, мета-<br>фосфат, орто-<br>(витлокит, α-фаза)   | Ca(PO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br>Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>        | 2,82<br>3,14                                    |
| фосфид                                                 | Ca <sub>3</sub> P <sub>2</sub>                                                              | 2,51                                            |
| фторид (флюорит,<br>α-фаза)                            | CaF <sub>2</sub>                                                                            | 3,18                                            |
| хлорид (гидрофи-<br>лит)                               | CaCl <sub>2</sub>                                                                           | 2,51 (25° C)                                    |
| <b>Кислород</b>                                        |                                                                                             |                                                 |
| Озон                                                   | O <sub>3</sub>                                                                              | 2,144·10 <sup>-3</sup>                          |
| Кислород фторид                                        | OF <sub>2</sub>                                                                             | 1,90 (—223,8° C)<br>ж.дк.                       |
| <b>Кобальт</b>                                         |                                                                                             |                                                 |
| (II) бромид                                            | CoBr <sub>2</sub>                                                                           | 4,91 (25° C)                                    |
| (II) гидроксид                                         | Co(OH) <sub>2</sub>                                                                         | 3,60 (15° C)                                    |
| иодат                                                  | Co(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                                           | 5,01                                            |
| иодид<br>(α-фаза)<br>(β-фаза)                          | CoI <sub>2</sub>                                                                            | 5,68<br>5,45                                    |
| карбонат                                               | CoCO <sub>3</sub>                                                                           | 4,13                                            |
| нитрат                                                 | Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                                        | 1,87—2,13                                       |
| (II) оксид                                             | CoO                                                                                         | 5,7                                             |
| (II, III) оксид                                        | Co <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                                              | 6,07                                            |
| (III) оксид                                            | Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                              | 5,18                                            |

| Название           | Формула                                         | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| (II) селенид       | CoSe                                            | 7,65                                            |
| силикат, орто-     | CoSiO <sub>4</sub>                              | 4,63                                            |
| сульфат            | CoSO <sub>4</sub>                               | 3,71 (25° C)                                    |
| (II) сульфид       | CoS                                             | 5,45                                            |
| (III) сульфид      | Co <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                  | 4,8                                             |
| сульфид, ди-       | CoS <sub>2</sub>                                | 4,27                                            |
| три-, сульфид,     | Co <sub>3</sub> S <sub>4</sub>                  | 4,86                                            |
| тетра-             |                                                 |                                                 |
| фосфид             | Co <sub>2</sub> P                               | 6,4 (16° C)                                     |
| (II) фторид        | CoF <sub>2</sub>                                | 4,46 (25° C)                                    |
| (III) фторид       | CoF <sub>3</sub>                                | 3,88                                            |
| (II) хлорид        | CoCl <sub>2</sub>                               | 3,36                                            |
| (III) хлорид       | CoCl <sub>3</sub>                               | 2,94                                            |
| <b>Кремний</b>     |                                                 |                                                 |
| (III) борид        | SiB <sub>3</sub>                                | 2,52                                            |
| (IV) бромид        | SiBr <sub>4</sub>                               | 2,77                                            |
| карбид             | SiC                                             | 3,22                                            |
| иодид              | SiI <sub>4</sub>                                | 4,2                                             |
| нитрид             | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>                  | 3,44                                            |
| (II) оксид         | SiO                                             | 2,13                                            |
| (IV) оксид (кварц) | SiO <sub>2</sub>                                | 2,65                                            |
| (IV) оксид (крис-  | SiO <sub>2</sub>                                | 2,32                                            |
| тобалит)           |                                                 |                                                 |
| (IV) оксид (три-   | SiO <sub>2</sub>                                | 2,26                                            |
| димит)             |                                                 |                                                 |
| сульфид            | SiS <sub>2</sub>                                | 2,02                                            |
| фторид             | SiF <sub>4</sub>                                | 4,684 · 10 <sup>-3</sup>                        |
| хлорид             | SiCl <sub>4</sub>                               | 1,48                                            |
| Кремниевая кис-    | H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                 | 3,17                                            |
| лота               |                                                 |                                                 |
| <b>Ксенон</b>      |                                                 |                                                 |
| (VI) оксид         | XeO <sub>3</sub>                                | 4,6                                             |
| (II) фторид        | XeF <sub>2</sub>                                | 4,32                                            |
| (IV) фторид        | XeF <sub>4</sub>                                | 4,04                                            |
| (VI) фторид        | XeF <sub>6</sub>                                | 3,6                                             |
| <b>Кюрий</b>       |                                                 |                                                 |
| (III) бромид       | CmBr <sub>3</sub>                               | 6,87                                            |
| (III) иодид        | CmI <sub>3</sub>                                | 6,37                                            |
| (III) фторид       | CmF <sub>3</sub>                                | 9,70                                            |
| (IV) фторид        | CmF <sub>4</sub>                                | 7,49                                            |
| (III) хлорид       | CmCl <sub>3</sub>                               | 5,81                                            |
| <b>Лантан</b>      |                                                 |                                                 |
| борид              | LaB <sub>6</sub>                                | 2,61                                            |
| бромид             | LaBr <sub>3</sub>                               | 5,07                                            |
| гидрид             | LaH <sub>3</sub>                                | 5,83                                            |
| иодид              | LaI <sub>3</sub>                                | 5,63                                            |
| карбид             | LaC <sub>2</sub>                                | 5,02                                            |
| оксид              | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 6,51 (15° C)                                    |
| сульфат            | La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 3,60 (15° C)                                    |
| сульфид            | La <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                  | 4,91 (11° C)                                    |
| фторид             | LaF <sub>3</sub>                                | 5,94                                            |
| хлорид             | LaCl <sub>3</sub>                               | 3,84                                            |
| <b>Литий</b>       |                                                 |                                                 |
| арсенат, орто-     | Li <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>                | 3,07 (15° C)                                    |
| борат, мета-       | LiBO <sub>2</sub>                               | 1,40 (42° C)                                    |

| Название           | Формула                                               | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| бромид             | LiBr                                                  | 3,46                                            |
| гидрид             | LiH                                                   | 0,78 (25° C)                                    |
| гидроксид          | LiOH                                                  | 1,46 (25° C)                                    |
| иодид              | LiI                                                   | 4,06                                            |
| карбонат           | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                       | 2,11 (0° C)                                     |
| нитрат             | LiNO <sub>3</sub>                                     | 2,36                                            |
| оксид              | Li <sub>2</sub> O                                     | 2,01 (25° C)                                    |
| пероксид           | Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                        | 2,36                                            |
| перхлорат          | LiClO <sub>4</sub>                                    | 2,43                                            |
| силикат, мета-     | Li <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                      | 2,52 (25° C)                                    |
| силикат, орто-     | Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>                      | 2,39 (25° C)                                    |
| сульфат            | Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                       | 2,22                                            |
| сульфид            | Li <sub>2</sub> S                                     | 1,66                                            |
| фосфат, орто-      | Li <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                       | 2,54                                            |
| фторид             | LiF                                                   | 2,63                                            |
| хлорат             | LiClO <sub>3</sub>                                    | 1,12                                            |
| хлорид             | LiCl                                                  | 2,07 (25° C)                                    |
| <b>Лютеций</b>     |                                                       |                                                 |
| бромид             | LuBr <sub>3</sub>                                     | 5,17                                            |
| оксид              | Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 9,42                                            |
| иодид              | LuI <sub>3</sub>                                      | 3,39                                            |
| фторид             | LuF <sub>3</sub>                                      | 8,33                                            |
| хлорид             | LuCl <sub>3</sub>                                     | 3,98                                            |
| <b>Магний</b>      |                                                       |                                                 |
| арсенид            | Mg <sub>3</sub> As <sub>2</sub>                       | 3,15 (25° C)                                    |
| борат, орто-       | Mg <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>       | 2,99                                            |
| бромид             | MgBr <sub>2</sub>                                     | 3,72 (25° C)                                    |
| гидроксид (брусит) | Mg(OH) <sub>2</sub>                                   | 2,35–2,46                                       |
| иодат              | Mg(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O | 3,3                                             |
| иодид              | MgI <sub>2</sub>                                      | 4,43 (25° C)                                    |
| карбонат (магне-   | MgCO <sub>3</sub>                                     | 2,96                                            |
| зит)               |                                                       |                                                 |
| нитрат             | Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O | 1,464                                           |
| нитрид             | Mg <sub>3</sub> N <sub>2</sub>                        | 2,71 (25° C)                                    |
| оксид (периклаз)   | MgO                                                   | 3,58 (25° C)                                    |
| силикат, мета-     | MgSiO <sub>3</sub>                                    | 3,18                                            |
| силикат, орто-     | Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                      | 3,21                                            |
| (форстерит)        |                                                       |                                                 |
| силицид            | Mg <sub>2</sub> Si                                    | 1,94                                            |
| сульфат            | MgSO <sub>4</sub>                                     | 2,66                                            |
| сульфид            | MgS                                                   | 2,84                                            |
| теллурид           | MgTe                                                  | 3,86                                            |
| фосфат, ди-        | Mg <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>         | 2,559                                           |
| фосфид             | Mg <sub>3</sub> P <sub>2</sub>                        | 2,05                                            |
| фторид             | MgF <sub>2</sub>                                      | 3,13                                            |
| хлорид             | MgCl <sub>2</sub>                                     | 2,32                                            |
| <b>Марганец</b>    |                                                       |                                                 |
| арсенид            | MnAs                                                  | 6,18                                            |
| борид              | MnB                                                   | 6,2                                             |
| борид, ди-         | MnB <sub>2</sub>                                      | 6,9                                             |
| бромид             | MnBr <sub>2</sub>                                     | 4,38                                            |
| гидроксид          | Mn(OH) <sub>2</sub>                                   | 3,26                                            |
| иодид              | MnI <sub>2</sub>                                      | 5,0                                             |
| три-, карбид       | Mn <sub>3</sub> C                                     | 6,89 (17° C)                                    |
| карбонат           | MnCO <sub>3</sub>                                     | 3,12                                            |
| (II) оксид         | MnO                                                   | 5,44                                            |
| (III) оксид (бра-  | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 4,50                                            |
| унит)              |                                                       |                                                 |

| Название                             | Формула                                                             | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> | Название                    | Формула                                                | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| (II, III) оксид<br>( $\alpha$ -фаза) | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 4,72                                         | оксид фторид,<br>тетра-     | MoF <sub>4</sub> O                                     | 3,00 (25 °C)                                 |
| (IV) оксид ( $\beta$ -фаза)          | MnO <sub>2</sub>                                                    | 5,03                                         | оксид, ди-, фто-            | MoF <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                        | 3,49 (25 °C)                                 |
| (VII) оксид                          | Mn <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                                      | 2,40                                         | рид, ди-                    |                                                        |                                              |
| селенид                              | MnSe                                                                | 5,55 (15 °C)                                 | силицид, ди-                | MoSi <sub>2</sub>                                      | 6,31                                         |
| силикат, мета-                       | MnSiO <sub>3</sub>                                                  | 3,72 (25 °C)                                 | (IV) сульфид                | MoS <sub>2</sub>                                       | 4,80                                         |
| силицид                              | MnSi                                                                | 5,90 (15 °C)                                 | ди-, сульфид, три-          | Mo <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                         | 5,91 (15 °C)                                 |
| силицид, ди-                         | MnSi <sub>2</sub>                                                   | 5,24 (13 °C)                                 | (VI) фторид                 | MoF <sub>6</sub>                                       | 2,55 (17,6 °C) ждк.                          |
| ди-, силицид                         | Mn <sub>2</sub> Si                                                  | 6,20 (15 °C)                                 | (II) хлорид                 | MoCl <sub>2</sub>                                      | 3,71 (25 °C)                                 |
| (II) сульфат                         | MnSO <sub>4</sub>                                                   | 3,25                                         | (III) хлорид                | MoCl <sub>3</sub>                                      | 3,58 (25 °C)                                 |
| сульфид ( $\alpha$ -фаза)            | MnS                                                                 | 3,99                                         | (V) хлорид                  | MoCl <sub>5</sub>                                      | 2,93 (25 °C)                                 |
| фосфат, орто-                        | Mn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O | 3,102                                        | Молибденовая кис-           | H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>                        | 3,11                                         |
| фосфат, ди-                          | Mn <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                       | 3,707 (25 °C)                                | лота                        |                                                        |                                              |
| фосфид                               | MnP                                                                 | 5,39                                         | <b>Мышьяк</b>               |                                                        |                                              |
| (II) фторид                          | MnF <sub>2</sub>                                                    | 3,98                                         | (III) бромид                | AsBr <sub>3</sub>                                      | 3,54 (25 °C)                                 |
| (II) хлорид                          | MnCl <sub>2</sub>                                                   | 2,98 (25 °C)                                 | (III) иодид                 | AsI <sub>3</sub>                                       | 4,39 (13 °C)                                 |
| <b>Медь</b>                          |                                                                     |                                              | (V) иодид                   | AsI <sub>5</sub>                                       | 3,93                                         |
| (I) арсенид                          | Cu <sub>3</sub> As                                                  | 8,0                                          | (III) оксид                 | As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | 3,74                                         |
| борид                                | Cu <sub>3</sub> B <sub>2</sub>                                      | 8,116                                        | (V) оксид                   | As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                         | 4,09                                         |
| (I) бромид ( $\alpha$ -фаза)         | CuBr                                                                | 4,72 (25 °C)                                 | (II) сульфид                | As <sub>2</sub> S <sub>2</sub>                         | 3,20                                         |
| (II) бромид                          | CuBr <sub>2</sub>                                                   | 4,77 (25 °C)                                 | (III) сульфид               | As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                         | 3,43                                         |
| гидрид                               | CuH                                                                 | 5,30                                         | (III) селенид               | As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>                        | 4,75                                         |
| (II) гидроксид                       | Cu(OH) <sub>2</sub>                                                 | 3,37                                         | (III) фторид                | AsF <sub>3</sub>                                       | 2,67 ждк.                                    |
| (II) нодат                           | Cu(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                   | 5,24 (15 °C)                                 | (V) фторид                  | AsF <sub>5</sub>                                       | 7,71 · 10 <sup>-3</sup>                      |
| (I) иодид                            | CuI                                                                 | 5,65                                         | (III) хлорид                | AsCl <sub>3</sub>                                      | 2,16 ждк.                                    |
| (I) карбид                           | Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                     | 4,40                                         | Арсин (мышьяко-             | AsH <sub>3</sub>                                       | 3.502 · 10 <sup>-5</sup>                     |
| (II) нитрат                          | Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ×<br>× 3H <sub>2</sub> O          | 2,32                                         | вистый водород)             |                                                        |                                              |
| (I) нитрид                           | Cu <sub>3</sub> N                                                   | 5,84 (25 °C)                                 | Мышьяковая кис-             | H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> · 1/2 H <sub>2</sub> O | 2,0—2,5                                      |
| (I) оксид                            | Cu <sub>2</sub> O                                                   | 6,0                                          | лота, орто-                 |                                                        |                                              |
| (II) оксид                           | CuO                                                                 | 6,45                                         | <b>Натрий</b>               |                                                        |                                              |
| (I) селенид                          | Cu <sub>2</sub> Se                                                  | 6,75 (30 °C)                                 | азид                        | NaN <sub>3</sub>                                       | 1,85                                         |
| (II) селенид                         | CuSe                                                                | 5,99                                         | арсенат, мета-              | NaAsO <sub>3</sub>                                     | 2,30                                         |
| силицид                              | Cu <sub>4</sub> Si                                                  | 7,53                                         | ацетат                      | NaCH <sub>3</sub> COO                                  | 1,53                                         |
| (II) сульфат                         | CuSO <sub>4</sub>                                                   | 3,60                                         | борат, мета-                | NaBO <sub>2</sub>                                      | 2,46                                         |
| (II) сульфат (мед-                   | CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O                               | 2,28                                         | борат, тетра-               | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>          | 2,37                                         |
| ный купорос)                         |                                                                     |                                              | бромат                      | NaBrO <sub>3</sub>                                     | 3,34 (17,5 °C)                               |
| (I) сульфид (мед-                    | Cu <sub>2</sub> S                                                   | 5,5—5,8                                      | бромид                      | NaBr                                                   | 3,21                                         |
| ный блеск) ( $\alpha$ -фаза)         |                                                                     |                                              | гидрид                      | NaH                                                    | 1,38                                         |
| (II) сульфид (ко-                    | CuS                                                                 | 4,68                                         | гидроборат, тетра-          | Na(BH <sub>4</sub> )                                   | 1,07                                         |
| веллин)                              |                                                                     |                                              | гидроксид ( $\alpha$ -фаза) | NaOH                                                   | 2,13                                         |
| (I) тиоционат                        | CuSCN                                                               | 2,84                                         | иодат                       | NaIO <sub>3</sub>                                      | 4,40                                         |
| (II) фторид                          | CuF <sub>2</sub>                                                    | 4,23                                         | иодид                       | NaI                                                    | 3,665 (4 °C)                                 |
| (I) хлорид ( $\alpha$ -фаза)         | CuCl                                                                | 3,7                                          | карбид                      | Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub>                         | 1,58 (15 °C)                                 |
| (II) хлорид                          | CuCl <sub>2</sub>                                                   | 3,05                                         | карбонат                    | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                        | 2,53                                         |
| (II) хлорид                          | CuCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O                               | 2,38                                         | карбонат, гидро-            | NaHCO <sub>3</sub>                                     | 2,16                                         |
| (I) цианид                           | CuCN                                                                | 2,92                                         | нитрат                      | NaNO <sub>3</sub>                                      | 2,26                                         |
| <b>Молибден</b>                      |                                                                     |                                              | нитрид                      | NaNO <sub>2</sub>                                      | 2,17 (0 °C)                                  |
| борид                                | MoB                                                                 | 8,65                                         | оксид                       | Na <sub>2</sub> O                                      | 2,27                                         |
| борид, ди-                           | MoB <sub>2</sub>                                                    | 7,12                                         | периодат                    | NaIO <sub>4</sub>                                      | 4,17                                         |
| ди-, борид                           | Mo <sub>2</sub> B                                                   | 9,26                                         | пероксид                    | Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                         | 2,60                                         |
| бромид                               | MoBr <sub>2</sub>                                                   | 4,88 (17,5 °C)                               | перхлорат                   | NaClO <sub>4</sub>                                     | 2,50                                         |
| (II) иодид                           | MoI <sub>2</sub>                                                    | 5,28 (25 °C)                                 | селенат                     | Na <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                       | 3,21 (17 °C)                                 |
| (IV) карбид                          | MoC                                                                 | 8,40                                         | селенид                     | Na <sub>2</sub> Se                                     | 2,63 (10 °C)                                 |
| ди-, карбид ( $\alpha$ -фа-          | Mo <sub>2</sub> C                                                   | 8,9                                          | силикат, мета-              | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                       | 2,4                                          |
| за)                                  |                                                                     |                                              | сульфат                     | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                        | 2,70                                         |
| карбонил, гекса-                     | Mo(CO) <sub>6</sub>                                                 | 1,96                                         | сульфат (глауберо-          | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O   | 1,46                                         |
| (IV) оксид                           | MoO <sub>2</sub>                                                    | 6,47                                         | ва соль)                    |                                                        |                                              |
| (VI) оксид)                          | MoO <sub>3</sub>                                                    | 4,69                                         | сульфат, гидро-             | NaHSO <sub>4</sub>                                     | 2,74                                         |
|                                      |                                                                     |                                              | сульфат, ди- (пиро-         | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>7</sub>          | 2,66 (25 °C)                                 |
|                                      |                                                                     |                                              | сульфат)                    |                                                        |                                              |
|                                      |                                                                     |                                              | сульфид                     | Na <sub>2</sub> S                                      | 1,86 (14 °C)                                 |
|                                      |                                                                     |                                              | сульфит                     | Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>                        | 2,63 (15 °C)                                 |



| Название         | Формула                                                             | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| теллурид         | Na <sub>2</sub> Te                                                  | 2,90                                         |
| фосфат, мета-    | NaPQ <sub>3</sub>                                                   | 2,48                                         |
| фосфат, орто-    | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                     | 2,54                                         |
| фторид           | NaF                                                                 | 2,79                                         |
| хлорат           | NaClO <sub>3</sub>                                                  | 2,49 (15° C)                                 |
| хлорид           | NaCl                                                                | 2,165 (25° C)                                |
| цианат           | NaOCN                                                               | 1,94                                         |
| цианид           | NaCN                                                                | 1,60                                         |
| <b>Неодим</b>    |                                                                     |                                              |
| бромид           | NdBr <sub>3</sub>                                                   | 5,35                                         |
| иодид            | NdI <sub>3</sub>                                                    | 2,34                                         |
| карбид, ди-      | NdC <sub>2</sub>                                                    | 5,15                                         |
| оксид            | Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 7,24                                         |
| сульфат          | Nd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O | 2,85                                         |
| сульфид          | Nd <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                      | 5,18 (11° C)                                 |
| хлорид           | NdCl <sub>3</sub>                                                   | 4,17                                         |
| <b>Нептуний</b>  |                                                                     |                                              |
| азид             | NpN                                                                 | 14,19                                        |
| (III) бромид     | NpBr <sub>3</sub>                                                   | 6,62                                         |
| (III) иодид      | NpI <sub>3</sub>                                                    | 6,82                                         |
| (II) оксид       | NpO                                                                 | 13,35                                        |
| (IV) оксид       | NpO <sub>2</sub>                                                    | 11,1                                         |
| сульфид          | Np <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                      | 8,9                                          |
| (III) фторид     | NpF <sub>3</sub>                                                    | 9,12                                         |
| (IV) фторид      | NpF <sub>4</sub>                                                    | 6,8                                          |
| (VI) фторид      | NpF <sub>6</sub>                                                    | 5,0                                          |
| (III) хлорид     | NpCl <sub>3</sub>                                                   | 5,58                                         |
| (IV) хлорид      | NpCl <sub>4</sub>                                                   | 4,95                                         |
| <b>Никель</b>    |                                                                     |                                              |
| антимонид        | NiSb                                                                | 7,54                                         |
| арсенид          | NiAs                                                                | 7,57 (0° C)                                  |
| борид            | NiB                                                                 | 7,39                                         |
| бромид           | NiBr <sub>2</sub>                                                   | 4,64                                         |
| гидроксид        | Ni(OH) <sub>2</sub>                                                 | 4,15                                         |
| иодат            | Ni(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                   | 5,07                                         |
| иодид            | NiI <sub>2</sub>                                                    | 5,83                                         |
| карбонил, тетра- | Ni(CO) <sub>4</sub>                                                 | 1,32                                         |
| нитрат           | Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O               | 2,05                                         |
| оксид            | NiO                                                                 | 7,45                                         |
| селенид          | NiSe                                                                | 8,46                                         |
| силицид          | Ni <sub>2</sub> Si                                                  | 7,2 (17° C)                                  |
| сульфат          | NiSO <sub>4</sub>                                                   | 3,68                                         |
| сульфид          | NiS                                                                 | 5,3—5,65                                     |
| фосфид           | Ni <sub>3</sub> P                                                   | 6,31 (15° C)                                 |
| фторид           | NiF <sub>2</sub>                                                    | 4,63                                         |
| хлорид           | NiCl <sub>2</sub>                                                   | 3,55                                         |
| <b>Ниобий</b>    |                                                                     |                                              |
| борид, ди-       | NbB <sub>2</sub>                                                    | 6,97                                         |
| (V) бромид       | NbBr <sub>5</sub>                                                   | 4,44                                         |
| (V) иодид        | NbI <sub>5</sub>                                                    | 5,11                                         |
| карбид           | NbC                                                                 | 7,74—8,2                                     |
| нитрид           | NbN                                                                 | 8,40                                         |
| (II) оксид       | NbO                                                                 | 7,26                                         |
| (IV) оксид       | NbO <sub>2</sub>                                                    | 5,9                                          |
| (V) оксид        | Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                      | 4,95                                         |
| (V) фторид       | NbF <sub>5</sub>                                                    | 3,29                                         |
| (V) хлорид       | NbCl <sub>5</sub>                                                   | 2,75                                         |

| Название                         | Формула                        | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Олово</b>                     |                                |                                              |
| (II) бромид                      | SnBr <sub>2</sub>              | 5,18 (17° C)                                 |
| (IV) бромид                      | SnBr <sub>4</sub>              | 3,34 (35° C) ждк.                            |
| (II) иодид                       | SnI <sub>2</sub>               | 5,28 (25° C)                                 |
| (IV) иодид                       | SnI <sub>4</sub>               | 4,47 (0° C)                                  |
| (II) оксид                       | SnO                            | 6,45 (0° C)                                  |
| (IV) оксид (касситерит) (α-фаза) | SnO <sub>2</sub>               | 6,95                                         |
| (II) сульфид                     | SnS                            | 5,08 (0° C)                                  |
| (IV) сульфид                     | SnS <sub>2</sub>               | 4,51                                         |
| (II) теллурид                    | SnTe                           | 6,48                                         |
| (IV) фторид                      | SnF <sub>4</sub>               | 4,78                                         |
| (II) хлорид                      | SnCl <sub>2</sub>              | 3,95 (25° C)                                 |
| (IV) хлорид                      | SnCl <sub>4</sub>              | 2,23 ждк.                                    |
| <b>Осмий</b>                     |                                |                                              |
| (IV) оксид                       | OsO <sub>2</sub>               | 7,91                                         |
| (VIII) оксид                     | OsO <sub>4</sub>               | 4,91 (22° C)                                 |
| (IV) сульфид                     | OsS <sub>2</sub>               | 9,47                                         |
| (VIII) фторид                    | OsF <sub>8</sub>               | 3,87                                         |
| <b>Палладий</b>                  |                                |                                              |
| бромид                           | PdBr <sub>2</sub>              | 5,17 (16° C)                                 |
| гидрид                           | PdH <sub>2</sub>               | 10,76                                        |
| иодид                            | PdI <sub>2</sub>               | 6,00                                         |
| оксид                            | PdO                            | 8,31                                         |
| сульфид                          | PdS                            | 6,60 (25° C)                                 |
| (II) фторид                      | PdF <sub>2</sub>               | 5,80                                         |
| (III) фторид                     | PdF <sub>3</sub>               | 5,06                                         |
| (II) хлорид                      | PdCl <sub>2</sub>              | 4,08                                         |
| <b>Платина</b>                   |                                |                                              |
| арсенид, ди-                     | PtAs <sub>2</sub>              | 11,8                                         |
| (II) бромид                      | PtBr <sub>2</sub>              | 6,65 (25° C)                                 |
| (IV) бромид                      | PtBr <sub>4</sub>              | 5,69 (25° C)                                 |
| (II) иодид                       | PtI <sub>2</sub>               | 6,40 (25° C)                                 |
| (III) иодид                      | PtI <sub>3</sub>               | 7,41 (25° C)                                 |
| (IV) иодид                       | PtI <sub>4</sub>               | 6,06 (25° C)                                 |
| (II) оксид                       | PtO                            | 14,9                                         |
| (IV) оксид                       | PtO <sub>2</sub>               | 10,2                                         |
| сульфид                          | PtS                            | 10,04 (25° C)                                |
| сульфид, ди-                     | PtS <sub>2</sub>               | 7,66 (25° C)                                 |
| (III) сульфид                    | Pt <sub>2</sub> S <sub>3</sub> | 5,52                                         |
| фосфид, ди-                      | PtP <sub>2</sub>               | 9,01 (25° C)                                 |
| (II) хлорид                      | PtCl <sub>2</sub>              | 5,87                                         |
| (III) хлорид                     | PtCl <sub>3</sub>              | 5,26 (25° C)                                 |
| (IV) хлорид                      | PtCl <sub>4</sub>              | 2,43                                         |
| <b>Плутоний</b>                  |                                |                                              |
| арсенид                          | PuAs                           | 10,39                                        |
| (III) бромид                     | PuBr <sub>3</sub>              | 6,69                                         |
| (II) гидрид                      | PuH <sub>2</sub>               | 10,40                                        |
| (III) гидрид                     | PuH <sub>3</sub>               | 9,61                                         |
| (III) иодид                      | PuI <sub>3</sub>               | 6,92                                         |
| (IV) карбид                      | PuC                            | 13,5                                         |
| нитрид                           | PuN                            | 14,25                                        |
| (II) оксид                       | PuO                            | 13,89                                        |
| (IV) оксид                       | PuO <sub>2</sub>               | 11,44                                        |
| сульфид                          | PuS                            | 10,6                                         |
| (III) фторид                     | PuF <sub>3</sub>               | 9,32                                         |
| (IV) фторид                      | PuF <sub>4</sub>               | 7,00                                         |
| (VI) фторид                      | PuF <sub>6</sub>               | 4,86                                         |
| (III) хлорид                     | PuCl <sub>3</sub>              | 5,70                                         |

| Название            | Формула                                                             | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Празеодим</b>    |                                                                     |                                              |
| бромид              | PrBr <sub>3</sub>                                                   | 5,26                                         |
| йодид               | PrI <sub>3</sub>                                                    | 2,31                                         |
| карбид, ди-         | PrC <sub>2</sub>                                                    | 5,10                                         |
| (II, IV) оксид      | Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 7,07                                         |
| (IV) оксид          | Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 6,82                                         |
| сульфат             | Pr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                     | 3,72 (16° C)                                 |
| сульфид             | Pr <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                      | 5,24                                         |
| фторид              | PrF <sub>3</sub>                                                    | 6,14                                         |
| хлорид              | PrCl <sub>3</sub>                                                   | 4,02 (25° C)                                 |
| <b>Протактиний</b>  |                                                                     |                                              |
| (II) оксид          | PaO                                                                 | 13,43                                        |
| (V) оксид           | Pa <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                      | 9,0                                          |
| (IV) фторид         | PaF <sub>4</sub>                                                    | 6,36                                         |
| (IV) хлорид         | PaCl <sub>4</sub>                                                   | 4,72                                         |
| <b>Радий</b>        |                                                                     |                                              |
| бромид              | RaBr <sub>2</sub>                                                   | 5,78                                         |
| хлорид              | RaCl <sub>2</sub>                                                   | 4,91                                         |
| <b>Рений</b>        |                                                                     |                                              |
| (IV) оксид          | ReO <sub>2</sub>                                                    | 11,4 (25° C)                                 |
| (VI) оксид          | ReO <sub>3</sub>                                                    | 6,9—7,3                                      |
| (VII) оксид         | Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                                      | 8,2                                          |
| оксид фторид,       | ReF <sub>4</sub> O                                                  | 3,717 ждк.                                   |
| тетра-              |                                                                     |                                              |
| оксид, три-, хло-   | ReClO <sub>3</sub> !                                                | 3,87                                         |
| рид                 |                                                                     |                                              |
| (IV) сульфид        | ReS <sub>2</sub>                                                    | 7,51                                         |
| (VII) сульфид       | Re <sub>2</sub> S <sub>7</sub>                                      | 4,87                                         |
| (IV) фторид         | ReF <sub>4</sub>                                                    | 5,38 (26° C)                                 |
| (VI) фторид         | ReF <sub>6</sub>                                                    | 3,62 ждк.                                    |
| (V) хлорид          | ReCl <sub>5</sub>                                                   | 4,9                                          |
| <b>Родий</b>        |                                                                     |                                              |
| (III) оксид         | Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 8,20                                         |
| сульфид             | Rh <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                      | 6,40 (25° C)                                 |
| фторид              | RhF <sub>3</sub>                                                    | 5,38                                         |
| <b>Ртуть</b>        |                                                                     |                                              |
| (I) бромид          | Hg <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>                                     | 7,31                                         |
| (II) бромид         | HgBr <sub>2</sub>                                                   | 6,11 (25° C)                                 |
| (I) йодид           | Hg <sub>2</sub> I <sub>2</sub>                                      | 7,70                                         |
| (II) йодид          | HgI <sub>2</sub>                                                    |                                              |
| (α-фаза)            |                                                                     | 6,36                                         |
| (β-фаза)            |                                                                     | 6,09                                         |
| (I) нитрат          | Hg <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O | 4,78                                         |
| (II) нитрат         | Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ×<br>× 1/2 H <sub>2</sub> O       | 4,39                                         |
| (I) нитрит          | Hg <sub>2</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>                     | 7,33                                         |
| (I) оксид           | Hg <sub>2</sub> O                                                   | 9,8                                          |
| (II) оксид          | HgO                                                                 | 11,1                                         |
| (II) селенид        | HgSe                                                                | 8,27                                         |
| (I) сульфат         | Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                     | 7,56                                         |
| (II) сульфат        | HgSO <sub>4</sub>                                                   | 6,47                                         |
| (II) сульфид (кино- | HgS                                                                 |                                              |
| варь)               |                                                                     | 8,10                                         |
| (α-фаза)            |                                                                     | 7,73                                         |
| (β-фаза)            |                                                                     | 8,73 (15° C)                                 |
| (I) фторид          | Hg <sub>2</sub> F <sub>2</sub>                                      | 8,95 (15° C)                                 |
| (II) фторид         | HgF <sub>2</sub>                                                    | 6,41                                         |
| (I) хлорат          | Hg <sub>2</sub> (ClO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                    |                                              |

| Название       | Формула                                                             | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| (I) хлорид     | Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>                                     | 7,15                                         |
| (II) хлорид    | HgCl <sub>2</sub>                                                   | 5,53                                         |
| (II) цианид    | Hg(CN) <sub>2</sub>                                                 | 4,00                                         |
| <b>Рубидий</b> |                                                                     |                                              |
| бромат         | RbBrO <sub>3</sub>                                                  | 3,68                                         |
| бромид         | RbBr                                                                | 3,36                                         |
| гидрид         | RbH                                                                 | 2,60                                         |
| гидроксид      | RbOH                                                                | 3,203 (11° C)                                |
| йодид          | RbI                                                                 | 3,55                                         |
| йодид, три-    | RbI <sub>3</sub>                                                    | 4,03                                         |
| карбонат       | Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                     | 3,47                                         |
| нитрат         | RbNO <sub>3</sub>                                                   | 3,11                                         |
| нитрид         | RbN <sub>3</sub>                                                    | 2,79                                         |
| оксид          | Rb <sub>2</sub> O                                                   | 3,72                                         |
| пероксид       | Rb <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                                      | 3,65 (0° C)                                  |
| перхлорат      | RbClO <sub>4</sub>                                                  | 2,80                                         |
| селенат        | Rb <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                    | 3,90                                         |
| сульфат        | Rb <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                     | 3,61                                         |
| сульфид        | Rb <sub>2</sub> S                                                   | 2,91                                         |
| ди-, сульфид,  | Rb <sub>2</sub> S <sub>5</sub>                                      | 2,62 (15° C)                                 |
| пента-         |                                                                     |                                              |
| супероксид     | RbO <sub>2</sub>                                                    | 3,80                                         |
| фторид         | RbF                                                                 | 3,56                                         |
| хлорид         | RbCl                                                                | 2,76                                         |
| <b>Рутений</b> |                                                                     |                                              |
| (IV) оксид     | RuO <sub>2</sub>                                                    | 6,97                                         |
| (VIII) оксид   | RuO <sub>4</sub>                                                    | 3,29                                         |
| (IV) сульфид   | RuS <sub>2</sub>                                                    | 6,99                                         |
| (V) фторид     | RuF <sub>5</sub>                                                    | 2,96 (16,5° C)                               |
| (III) хлорид   | RuCl <sub>3</sub>                                                   | 3,11                                         |
| <b>Самарий</b> |                                                                     |                                              |
| (II) бромид    | SmBr <sub>2</sub>                                                   | 5,1                                          |
| (III) бромид   | SmBr <sub>3</sub>                                                   | 5,40                                         |
| (III) йодид    | SmI <sub>3</sub>                                                    | 3,14                                         |
| карбид         | SmC <sub>2</sub>                                                    | 5,86                                         |
| (II) нитрат    | Sm(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O               | 2,38                                         |
| (III) оксид    | Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 7,43 (15° C)                                 |
| (III) сульфат  | Sm <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 8H <sub>2</sub> O | 2,93                                         |
| сульфид        | Sm <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                      | 5,73                                         |
| (III) фторид   | SmF <sub>3</sub>                                                    | 6,64                                         |
| (II) хлорид    | SmCl <sub>2</sub>                                                   | 4,56 (25° C)                                 |
| (III) хлорид   | SmCl <sub>3</sub>                                                   | 4,46                                         |
| <b>Свинец</b>  |                                                                     |                                              |
| арсенат        | Pb(AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                                  | 7,80                                         |
| (II) бромид    | PbBr <sub>2</sub>                                                   | 6,67                                         |
| иодат          | Pb(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                   | 6,16                                         |
| йодид          | PbI <sub>2</sub>                                                    | 6,16                                         |
| карбонат       | PbCO <sub>3</sub>                                                   | 6,56                                         |
| нитрид         | Pb(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                    |                                              |
| (α-фаза)       |                                                                     | 4,71                                         |
| (β-фаза)       |                                                                     | 4,93                                         |
| нитрат         | Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                   | 4,53                                         |
| (I) оксид      | Pb <sub>2</sub> O                                                   | 8,342                                        |
| (II) оксид     | PbO                                                                 |                                              |
| (α-фаза)       |                                                                     | 9,51                                         |
| (β-фаза)       |                                                                     | 8,70                                         |
| (II, IV) оксид | Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                                      | 8,79                                         |
| (сурик)        |                                                                     |                                              |

| Название                  | Формула                          | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$              |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| (IV) оксид                | $\text{PbO}_2$                   | 9,67                                          |
| ( $\alpha$ -фаза)         |                                  | 9,33                                          |
| ( $\beta$ -фаза)          |                                  | 6,37                                          |
| селенат                   | $\text{PbSeO}_4$                 | 8,10 ( $15^\circ \text{C}$ )                  |
| селенид                   | $\text{SbSe}$                    | 6,49                                          |
| силикат, мета-            | $\text{PbSiO}_3$                 | 6,35                                          |
| сульфат                   | $\text{PbSO}_4$                  | 7,59                                          |
| сульфид                   | $\text{PbS}$                     | 8,16                                          |
| теллурид                  | $\text{PbTe}$                    | 6,9—7,3                                       |
| фосфат, орто-             | $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$     | 8,37                                          |
| фторид                    | $\text{PbF}_2$                   | 7,68                                          |
| ( $\alpha$ -фаза)         |                                  | 3,89                                          |
| ( $\beta$ -фаза)          |                                  | 5,85                                          |
| хлорат                    | $\text{Pb}(\text{ClO}_3)_2$      | 3,18 ( $0^\circ \text{C}$ )                   |
| (II) хлорид               | $\text{PbCl}_2$                  |                                               |
| (IV) хлорид               | $\text{PbCl}_4$                  |                                               |
| <b>Селен</b>              |                                  |                                               |
| (I) бромид                | $\text{Se}_2\text{Br}_2$         | 3,60 ( $15^\circ \text{C}$ )                  |
| гидрид                    | $\text{H}_2\text{Se}$            | 2,00 ( $-42^\circ \text{C}$ ) ждк.            |
| карбид                    | $\text{SeC}_2$                   | 2,68                                          |
| (IV) оксид                | $\text{SeO}_2$                   | 3,95 ( $16^\circ \text{C}$ )                  |
| (VI) оксид                | $\text{SeO}_3$                   | 3,6                                           |
| оксид фторид, ди-         | $\text{SeF}_2\text{O}$           | 2,67                                          |
| оксид хлорид, ди-         | $\text{SeCl}_2\text{O}$          | 2,42                                          |
| сульфид                   | $\text{SeS}$                     | 3,06 ( $0^\circ \text{C}$ )                   |
| (IV) фторид               | $\text{SeF}_4$                   | 2,75 ( $25^\circ \text{C}$ ) ждк.             |
| (VI) фторид               | $\text{SeF}_6$                   | $2,26 \cdot 10^{-3}$ ( $-35^\circ \text{C}$ ) |
| (I) хлорид                | $\text{Se}_2\text{Cl}_2$         | 2,91 ( $17,5^\circ \text{C}$ )                |
| (IV) хлорид               | $\text{SeCl}_4$                  | 3,80                                          |
| Селенистая кислота        | $\text{H}_2\text{SeO}_3$         | 3,00 ( $15^\circ \text{C}$ )                  |
| Селеновая кислота         | $\text{H}_2\text{SeO}_4$         | 2,95 ( $15^\circ \text{C}$ )                  |
| Селеноводород             | $\text{H}_2\text{Se}$            | $3,670 \cdot 10^{-3}$                         |
| <b>Сера</b>               |                                  |                                               |
| (I) бромид                | $\text{S}_2\text{Br}_2$          | 2,63                                          |
| гидрид                    | $\text{H}_2\text{S}$             | 0,96 ( $-60^\circ \text{C}$ )                 |
| (IV) оксид                | $\text{SO}_2$                    | $2,927 \cdot 10^{-3}$                         |
| (VI) оксид                | $\text{SO}_3$                    | 1,97 ждк.                                     |
| ди-, оксид хлорид, тетра- | $\text{S}_2\text{OCl}_4$         | 1,66 ( $0^\circ \text{C}$ )                   |
| (I) фторид                | $\text{S}_2\text{F}_2$           | 1,5 ( $-100^\circ \text{C}$ ) ждк.            |
| (IV) фторид               | $\text{SF}_4$                    | 1,92 ( $-73^\circ \text{C}$ ) ждк.            |
| (VI) фторид               | $\text{SF}_6$                    | $6,50 \cdot 10^{-3}$                          |
| ди-, фторид, дека-        | $\text{S}_2\text{F}_{10}$        | 2,08 ( $0^\circ \text{C}$ )                   |
| (I) хлорид                | $\text{S}_2\text{Cl}_2$          | 1,67 ( $25^\circ \text{C}$ )                  |
| (II) хлорид               | $\text{SCl}_2$                   | 1,62 ( $15^\circ \text{C}$ )                  |
| Двусерная кислота         | $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$ | 1,9                                           |
| Серная кислота            | $\text{H}_2\text{SO}_4$          | 1,8305                                        |
| Сероводород               | $\text{H}_2\text{S}$             | $1,538 \cdot 10^{-3}$ ( $25^\circ \text{C}$ ) |
| Сульфурил фторид          | $\text{SO}_2\text{F}_2$          | $3,72 \cdot 10^{-3}$                          |
| Сульфурил фторид хлорид   | $\text{SO}_2\text{ClF}$          | $1,623 \cdot 10^{-3}$ ( $0^\circ \text{C}$ )  |
| Сульфурил хлорид          | $\text{SO}_2\text{Cl}_2$         | 1,67                                          |
| Тионил фторид             | $\text{SOF}_2$                   | $2,93 \cdot 10^{-3}$                          |
| Тионил хлорид             | $\text{SOCl}_2$                  | 1,655 ( $10,4^\circ \text{C}$ )               |
| Хлоросерная кислота       | $\text{HSO}_3\text{Cl}$          | 1,77                                          |
| <b>Серебро</b>            |                                  |                                               |
| арсенат, орто-            | $\text{Ag}_3\text{AsO}_4$        | 6,66 ( $25^\circ \text{C}$ )                  |
| бромат                    | $\text{AgBrO}_3$                 | 5,21                                          |
| бромид                    | $\text{AgBr}$                    | 6,47 ( $25^\circ \text{C}$ )                  |

| Название                      | Формула                                             | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------|
| иодат                         | $\text{AgIO}_3$                                     | 5,53 ( $16,5^\circ \text{C}$ )   |
| иодид                         | $\text{AgI}$                                        | 5,71                             |
| ( $\alpha$ -фаза)             |                                                     | 5,61—5,67                        |
| ( $\beta$ -фаза)              |                                                     | 6,08                             |
| карбонат                      | $\text{Ag}_2\text{CO}_3$                            | 4,35                             |
| нитрат                        | $\text{AgNO}_3$                                     | 4,45                             |
| нитрит                        | $\text{Ag}_2\text{O}$                               | 7,22                             |
| (I) оксид                     | $\text{AgO}$                                        | 7,44                             |
| (II) оксид                    | $\text{Ag}_2\text{O}$                               | 5,57                             |
| периодат                      | $\text{AgIO}_4$                                     | 2,81                             |
| перхлорат                     | $\text{AgClO}_4$                                    | 5,72                             |
| селенат                       | $\text{Ag}_2\text{SeO}_4$                           | 8,0                              |
| селенид                       | $\text{Ag}_2\text{Se}$                              | 5,45 ( $29,2^\circ \text{C}$ )   |
| сульфат ( $\alpha$ -фаза)     | $\text{Ag}_2\text{SO}_4$                            | 7,32                             |
| сульфид                       | $\text{Ag}_2\text{S}$                               | 8,5                              |
| теллурид                      | $\text{Ag}_2\text{Te}$                              | 6,37 ( $25^\circ \text{C}$ )     |
| фосфат, орто-                 | $\text{Ag}_3\text{PO}_4$                            | 5,85 ( $15^\circ \text{C}$ )     |
| (I) фторид                    | $\text{AgF}$                                        | 4,57                             |
| (II) фторид                   | $\text{AgF}_2$                                      | 4,43                             |
| хлорат                        | $\text{AgClO}_3$                                    | 5,56                             |
| хлорид                        | $\text{AgCl}$                                       | 3,95                             |
| цианид                        | $\text{AgCN}$                                       |                                  |
| <b>Скандий</b>                |                                                     |                                  |
| борид                         | $\text{ScB}_2$                                      | 3,65                             |
| бромид                        | $\text{ScBr}_3$                                     | 3,91                             |
| оксид                         | $\text{Sc}_2\text{O}_3$                             | 3,86                             |
| сульфат                       | $\text{Sc}_2(\text{SO}_4)_3$                        | 2,58                             |
| хлорид                        | $\text{ScCl}_3$                                     | 2,39 ( $25^\circ \text{C}$ )     |
| <b>Стронций</b>               |                                                     |                                  |
| борид                         | $\text{SrB}_6$                                      | 3,39 ( $15^\circ \text{C}$ )     |
| бромид                        | $\text{SrBr}_2$                                     | 4,22 ( $24^\circ \text{C}$ )     |
| гидрид                        | $\text{SrH}_2$                                      | 3,72                             |
| гидроксид                     | $\text{Sr}(\text{OH})_2$                            | 3,63                             |
| иодат                         | $\text{Sr}(\text{IO}_3)_2$                          | 5,05 ( $15^\circ \text{C}$ )     |
| иодид                         | $\text{SrI}_2$                                      | 4,55 ( $25^\circ \text{C}$ )     |
| карбид                        | $\text{SrC}_2$                                      | 3,2                              |
| карбонат                      | $\text{SrCO}_3$                                     | 3,70                             |
| нитрат                        | $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$                          | 2,99                             |
| нитрит                        | $\text{Sr}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 2,41 ( $0^\circ \text{C}$ )      |
| оксид                         | $\text{SrO}$                                        | 4,7                              |
| пероксид                      | $\text{SrO}_2$                                      | 4,56                             |
| селенат                       | $\text{SrSeO}_4$                                    | 4,23                             |
| селенид                       | $\text{SrSe}$                                       | 4,38                             |
| сульфат                       | $\text{SrSO}_4$                                     | 3,96                             |
| сульфид                       | $\text{SrS}$                                        | 3,70 ( $15^\circ \text{C}$ )     |
| теллурид                      | $\text{SrTe}$                                       | 4,83                             |
| фторид                        | $\text{SrF}_2$                                      | 4,24                             |
| фторид хлорид                 | $\text{SrClF}$                                      | 4,18                             |
| хлорат                        | $\text{Sr}(\text{ClO}_3)_2$                         | 3,15                             |
| хлорид                        | $\text{SrCl}_2$                                     | 3,05                             |
| <b>Сурьма</b>                 |                                                     |                                  |
| (III) бромид                  | $\text{SbBr}_3$                                     | 4,15                             |
| гидрид                        | $\text{SbH}_3$                                      | $2,26 \cdot 10^{-3}$             |
| (III) иодид                   | $\text{SbI}_3$                                      | 4,92 ( $17^\circ \text{C}$ )     |
| (III) оксид ( $\alpha$ -фаза) | $\text{Sb}_2\text{O}_3$                             | 5,19 ( $25^\circ \text{C}$ )     |
| (IV) оксид                    | $\text{Sb}_2\text{O}_4$                             | 4,07                             |
| (V) оксид                     | $\text{Sb}_2\text{O}_5$                             | 3,78                             |
| сульфат                       | $\text{Sb}_2(\text{SO}_4)_3$                        | 3,62 ( $4^\circ \text{C}$ )      |
| (III) сульфид                 | $\text{Sb}_2\text{S}_3$                             | 4,64                             |
| (V) сульфид                   | $\text{Sb}_2\text{S}_5$                             | 4,12                             |

| Название                           | Формула    | Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------------------|------------|-------------------------------------|
| (III) теллурид                     | $Sb_2Te_3$ | 6,50 (13° C)                        |
| (III) фторид                       | $SbF_3$    | 4,38 (25° C)                        |
| (V) фторид                         | $SbF_5$    | 2,99 (23° C) ждк.                   |
| (III) хлорид                       | $SbCl_3$   | 3,14                                |
| (V) хлорид                         | $SbCl_5$   | 2,34 ждк.                           |
| Стибин (сурьмяни-<br>стый водород) | $SbH_3$    | $4,36 \cdot 10^{-3}$ (15° C)        |
| <b>Таллий</b>                      |            |                                     |
| (I) бромид                         | $TlBr$     | 7,56 (17° C)                        |
| (I) иодид                          | $TlI$      | 7,07                                |
| ( $\alpha$ -фаза)                  |            | 7,30                                |
| ( $\beta$ -фаза)                   |            | 7,557                               |
| (III) иодид                        | $TlI_3$    | 7,2                                 |
| карбонат                           | $Tl_2CO_3$ | 5,56 (21,4° C)                      |
| нитрат                             | $TlNO_3$   | 9,52 (16° C)                        |
| (I) оксид                          | $Tl_2O$    | 9,65                                |
| (III) оксид                        | $Tl_2O_3$  | 4,89                                |
| перхлорат                          | $TlClO_4$  | 9,05 (25° C)                        |
| селенид                            | $Tl_2Se$   | 6,67                                |
| сульфат ( $\alpha$ -фаза)          | $Tl_2SO_4$ | 8,46                                |
| (I) сульфид                        | $Tl_2S$    | 4,96                                |
| тиоцианат                          | $TlSCN$    | 6,89 (10° C)                        |
| фосфат, орто-                      | $Tl_3PO_4$ | 8,36                                |
| (I) фторид ( $\alpha$ -фаза)       | $TlF$      | 8,36 (25° C)                        |
| (III) фторид                       | $TlF_3$    | 7,00                                |
| (I) хлорид                         | $TlCl$     |                                     |
| <b>Тантал</b>                      |            |                                     |
| борид                              | $TaB_2$    | 12,38                               |
| (V) бромид                         | $TaBr_5$   | 4,67                                |
| (V) иодид                          | $TaI_5$    | 5,80                                |
| карбид                             | $TaC$      | 14,4                                |
| нитрид                             | $TaN$      | 14,36                               |
| (V) оксид ( $\alpha$ -фаза)        | $Ta_2O_5$  | 8,53                                |
| (V) фторид                         | $TaF_5$    | 4,74                                |
| (V) хлорид                         | $TaCl_5$   | 3,76                                |
| <b>Теллур</b>                      |            |                                     |
| (II) бромид                        | $TeBr_2$   | 5,24                                |
| (IV) бромид                        | $TeBr_4$   | 4,31 (15° C)                        |
| гидрид                             | $TeH_2$    | 2,68 (—12° C)                       |
| (IV) иодид                         | $TeI_4$    | 5,40                                |
| (IV) оксид                         | $TeO_2$    | 5,87                                |
| ( $\beta$ -фаза)                   |            | 6,02                                |
| ( $\alpha$ -фаза)                  |            | 5,08                                |
| (VI) оксид                         | $TeO_3$    | 2,56 (—26° C) ждк.                  |
| (VI) фторид                        | $TeF_6$    | 7,05                                |
| (II) хлорид                        | $TeCl_2$   | 3,26                                |
| (IV) хлорид                        | $TeCl_4$   | 3,05                                |
| Теллуристая кис-<br>лота           | $H_2TeO_3$ |                                     |
| Теллуровая кисло-<br>та, орто-     | $H_6TeO_6$ |                                     |
| ( $\alpha$ -фаза)                  |            | 3,07                                |
| ( $\beta$ -фаза)                   |            | 3,17                                |
| Теллуrowодород                     | $H_2Te$    | $5,81 \cdot 10^{-3}$                |
| <b>Тербий</b>                      |            |                                     |
| бромид                             | $TbBr_3$   | 4,67                                |
| иодид                              | $TbI_3$    | 3,16                                |
| оксид                              | $Tb_2O_3$  | 7,81                                |
| фторид                             | $TbF_3$    | 7,24                                |
| хлорид                             | $TbCl_3$   | 4,35                                |

| Название                               | Формула      | Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| <b>Титан</b>                           |              |                                     |
| (I) борид                              | $TiB$        | 5,09                                |
| (II) борид                             | $TiB_2$      | 4,50                                |
| (II) бромид                            | $TiBr_2$     | 4,31                                |
| (IV) бромид ( $\beta$ -фаза)           | $TiBr_4$     | 3,24                                |
| гидрид                                 | $TiH_2$      | 3,9 (12° C)                         |
| (II) иодид                             | $TiI_2$      | 4,99                                |
| (IV) иодид                             | $TiI_4$      | 4,40 (25° C)                        |
| карбид                                 | $TiC$        | 4,92                                |
| нитрид                                 | $TiN$        | 5,43                                |
| (II) оксид                             | $TiO$        | 4,93                                |
| (III) оксид                            | $Ti_2O_3$    | 4,6                                 |
| (IV) оксид                             | $TiO_2$      | 3,84                                |
| сульфид                                | $Ti_2S$      | 4,12                                |
| ди-, сульфид, три-                     | $Ti_2S_3$    | 3,58                                |
| сульфид, ди-                           | $TiS_2$      | 3,22                                |
| фосфид                                 | $TiP$        | 3,95 (25° C)                        |
| (III) фторид                           | $TiF_3$      | 3,40                                |
| (IV) фторид                            | $TiF_4$      | 2,79                                |
| (II) хлорид                            | $TiCl_2$     | 3,13                                |
| (III) хлорид                           | $TiCl_3$     | 2,64                                |
| (IV) хлорид                            | $TiCl_4$     | 1,73                                |
| <b>Торий</b>                           |              |                                     |
| (IV) борид                             | $ThB_4$      | 8,45                                |
| (VI) борид                             | $ThB_6$      | 6,4 (15° C)                         |
| бромид                                 | $ThBr_4$     | 5,67                                |
| гидрид                                 | $ThH_2$      | 5,92                                |
| иодид                                  | $ThI_4$      | 6,00                                |
| карбид                                 | $ThC_2$      | 8,96                                |
| оксид                                  | $ThO_2$      | 9,69                                |
| силикат, орто-                         | $ThSiO_4$    | 6,82 (16° C)                        |
| силицид                                | $ThSi_3$     | 7,96 (16° C)                        |
| сульфат                                | $Th(SO_4)_2$ | 4,22                                |
| сульфид                                | $ThS_2$      | 7,36                                |
| фосфат, мета-                          | $Th(PO_3)_4$ | 4,08 (16° C)                        |
| фосфид                                 | $Th_3P_4$    | 8,56                                |
| фторид                                 | $ThF_4$      | 6,19                                |
| хлорид                                 | $ThCl_4$     | 4,59 (15° C)                        |
| <b>Тулий</b>                           |              |                                     |
| бромид                                 | $TmBr_3$     | 5,02                                |
| иодид                                  | $TmI_3$      | 3,32                                |
| оксид                                  | $Tm_2O_3$    | 8,77                                |
| фторид                                 | $TmF_3$      | 7,97                                |
| <b>Углерод</b>                         |              |                                     |
| бромид                                 | $CBBr_4$     | 3,42                                |
| иодид                                  | $CI_4$       | 4,34                                |
| (II) оксид                             | $CO$         | $1,25 \cdot 10^{-3}$ (0° C)         |
| (IV) оксид                             | $CO_2$       | $1,977 \cdot 10^{-3}$ (0° C)        |
| три-, оксид, ди-                       | $C_3O_2$     | 1,11 (0° C) ждк.                    |
| селенид                                | $CSe_2$      | 2,66 (25° C)                        |
| три-, сульфид, ди-                     | $C_3S_2$     | 1,27                                |
| сульфид                                | $CS$         | 1,66                                |
| сульфид, ди- (серо-<br>углерод)        | $CS_2$       | 1,263                               |
| фторид                                 | $CF_4$       | 1,96 (—184° C) ждк.                 |
| хлорид (четырёх-<br>хлористый углерод) | $CCl_4$      | 1,587                               |
| Дициан                                 | $(CN)_2$     | $2,335 \cdot 10^{-3}$               |
| Карбонил бромид                        | $COBr_2$     | 2,44                                |

| Название                 | Формула                                                                     | Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Карбонил селенид         | COSe                                                                        | 1,81 (4° C) ждк.                    |
| Карбонил сульфид         | COS                                                                         | $1,073 \cdot 10^{-3}$               |
| Карбонил фторид          | COF <sub>2</sub>                                                            | 1,139 (—114° C) ждк.                |
| Карбонил хлорид (фосген) | COCl                                                                        | $1,392 \cdot 10^{-3}$               |
| Тиокарбонил селенид      | CSSe                                                                        | 1,99                                |
| Тиокарбонил хлорид       | CSCl <sub>2</sub>                                                           | 1,51 (15° C)                        |
| Циановодород             | HCN                                                                         | 0,688 ждк.                          |
| <b>Уран</b>              |                                                                             |                                     |
| борид                    | UB <sub>2</sub>                                                             | 12,70                               |
| (III) бромид             | UBr <sub>3</sub>                                                            | 6,53                                |
| (IV) бромид              | UBr <sub>4</sub>                                                            | 5,35                                |
| гидрид                   | UH <sub>3</sub>                                                             | 10,95                               |
| (III) иодид              | UI <sub>3</sub>                                                             | 6,38                                |
| (IV) иодид               | UI <sub>4</sub>                                                             | 5,6 (15° C)                         |
| карбид                   | UC                                                                          | 13,63                               |
| карбид, ди-              | UC <sub>2</sub>                                                             | 11,68                               |
| (IV) оксид               | UO <sub>2</sub>                                                             | 10,95                               |
| (VI) оксид               | UO <sub>3</sub>                                                             | 8,34                                |
| (α-фаза)                 |                                                                             | 8,02                                |
| (β-фаза)                 |                                                                             | 8,30                                |
| три-, оксид, окта-       | U <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                               | 14,31                               |
| нитрид                   | UN                                                                          | 10,87                               |
| сульфид                  | US                                                                          | 7,96 (25° C)                        |
| сульфид, ди-             | US <sub>2</sub>                                                             | 8,96                                |
| (III) фторид             | UF <sub>3</sub>                                                             | 6,7—6,9                             |
| (IV) фторид              | UF <sub>4</sub>                                                             | 5,81                                |
| (V) фторид               | UF <sub>5</sub>                                                             | 5,06                                |
| (VI) фторид              | UF <sub>6</sub>                                                             | 5,35                                |
| (III) хлорид             | UCl <sub>3</sub>                                                            | 4,87                                |
| (IV) хлорид              | UCl <sub>4</sub>                                                            | 3,81                                |
| (V) хлорид               | UCl <sub>5</sub>                                                            | 3,56                                |
| (VI) хлорид              | UCl <sub>6</sub>                                                            | 2,89 (15° C)                        |
| Уранил ацетат            | UO <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> ×<br>× 2H <sub>2</sub> O | 3,35                                |
| Уранил нитрат            | UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O         | 3,28 (16,5° C)                      |
| Уранил сульфат           | UO <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 3H <sub>2</sub> O                         | 5,8 расч.                           |
| Уранил фторид            | UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>                                              | 5,28                                |
| Уранил хлорид            | UO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>                                             |                                     |
| <b>Фосфор</b>            |                                                                             |                                     |
| (III) бромид             | PBr <sub>3</sub>                                                            | 2,85 (15° C)                        |
| (III) иодид              | PI <sub>3</sub>                                                             | 3,89                                |
| нитрид хлорид, ди-       | (PCl <sub>2</sub> N) <sub>3</sub>                                           | 1,98                                |
| (III) оксид              | P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                               | 2,135                               |
| (IV) оксид               | PO <sub>2</sub>                                                             | 2,54                                |
| (V) оксид                | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                               | 2,30                                |
| тетра-, селенид, три-    | P <sub>4</sub> Se <sub>3</sub>                                              | 1,31                                |
| тетра-, сульфид, три-    | P <sub>4</sub> S <sub>3</sub>                                               | 2,03 (17° C)                        |
| тетра-, сульфид, гепта-  | P <sub>4</sub> S <sub>7</sub>                                               | 2,19 (17° C)                        |
| тетра-, сульфид, дека-   | P <sub>4</sub> S <sub>10</sub>                                              | 2,03                                |
| (III) фторид             | PF <sub>3</sub>                                                             | $3,907 \cdot 10^{-3}$               |
| (V) фторид               | PF <sub>5</sub>                                                             | $5,805 \cdot 10^{-3}$               |
| фторид, три-, хло-       | PCl <sub>2</sub> F <sub>3</sub>                                             | $5,4 \cdot 10^{-3}$                 |
| рид, ди-                 |                                                                             |                                     |
| (III) хлорид             | PCl <sub>3</sub>                                                            | 1,57                                |
| (V) хлорид               | PCl <sub>5</sub>                                                            | 2,11                                |

| Название                 | Формула                                         | Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Тиофосфорил бромид       | PSBr <sub>3</sub>                               | 2,85 (17° C)                        |
| Тиофосфорил хлорид       | PSCl <sub>3</sub>                               | 1,64                                |
| Фосфин                   | PH <sub>3</sub>                                 | $1,529 \cdot 10^{-3}$               |
| Фосфин, ди-              | P <sub>2</sub> H <sub>4</sub>                   | 1,012                               |
| Фосфоний иодид           | PH <sub>4</sub> I                               | 2,86                                |
| Фосфорил бромид          | POBr <sub>3</sub>                               | 2,82                                |
| Фосфорил фторид          | POF <sub>3</sub>                                | $4,8 \cdot 10^{-3}$                 |
| Фосфорил хлорид          | POCl <sub>3</sub>                               | 1,675 ждк.                          |
| Фосфористая кислота      | H <sub>2</sub> (HPO <sub>3</sub> )              | 1,65                                |
| Фосфорная кислота, мета- | HPO <sub>3</sub>                                | 2,2—2,5                             |
| Фосфорная кислота, орто- | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                  | 1,83 (18° C)                        |
| Фосфорноватистая кислота | H(H <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> )              | 1,49                                |
| <b>Фтор</b>              |                                                 |                                     |
| оксид                    | F <sub>2</sub> O                                | 1,90 (—224° C)                      |
| оксид, ди-               | F <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                   | 1,45 (—57° C)                       |
| фтороводород             | HF                                              | 0,991 (—19,9° C) ждк.               |
| <b>Хлор</b>              |                                                 |                                     |
| гидрат-, окта-           | Cl <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O             | 1,23                                |
| (I) оксид                | Cl <sub>2</sub> O                               | $3,89 \cdot 10^{-3}$ (0° C)         |
| (IV) оксид               | ClO <sub>2</sub>                                | 1,64 (0° C) ждк.                    |
| (VII) оксид              | Cl <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                  | 1,86 (0° C)                         |
| фторид                   | ClF                                             | 1,62 (—108° C) ждк.                 |
| фторид, три-             | ClF <sub>3</sub>                                | 1,866 (10° C)                       |
| Хлорная кислота          | HClO <sub>4</sub>                               | 1,768                               |
| Хлороводород             | HCl                                             | $1,639 \cdot 10^{-3}$               |
| <b>Хром</b>              |                                                 |                                     |
| арсенид                  | CrAs                                            | 6,35 (16° C)                        |
| борид                    | CrB                                             | 6,17                                |
| (II) бромид              | CrBr <sub>2</sub>                               | 4,37                                |
| (III) бромид             | CrBr <sub>3</sub>                               | 4,25 (25° C)                        |
| (II) иодид               | CrI <sub>2</sub>                                | 5,20                                |
| (III) иодид              | CrI <sub>3</sub>                                | 4,92 (25° C)                        |
| карбид                   | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>                  | 6,68                                |
| карбонил, гекса          | Cr(CO) <sub>6</sub>                             | 1,77                                |
| нитрид                   | CrN                                             | 5,8                                 |
| (III) оксид              | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 5,21                                |
| (VI) оксид               | CrO <sub>3</sub>                                | 2,70                                |
| оксид, ди-, хло-         | CrCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                | 1,91                                |
| рид, ди-                 |                                                 |                                     |
| силицид                  | Cr <sub>2</sub> Si <sub>3</sub>                 | 5,5 (0° C)                          |
| сульфат                  | Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 3,01                                |
| сульфид                  | CrS                                             | 4,85                                |
| фосфид                   | CrP                                             | 5,7 (15° C)                         |
| (II) фторид              | CrF <sub>2</sub>                                | 4,11                                |
| (III) фторид             | CrF <sub>3</sub>                                | 3,78                                |
| (II) хлорид              | CrCl <sub>2</sub>                               | 2,88 (25° C)                        |
| (III) хлорид             | CrCl <sub>3</sub>                               | 3,03                                |
| <b>Цезий</b>             |                                                 |                                     |
| амид                     | CsNH <sub>2</sub>                               | 3,44 (25° C)                        |
| бромат                   | CsBrO <sub>3</sub>                              | 4,11 (16° C)                        |
| бромид                   | CsBr                                            | 4,44                                |
| гидрид                   | CsH                                             | 3,41                                |
| гидроксид                | CsOH                                            | 3,68                                |
| нодат                    | CsIO <sub>3</sub>                               | 4,85                                |
| иодид                    | CsI                                             | 4,51 (25° C)                        |

| Название               | Формула                                               | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| иодид-, три-<br>нитрат | CsI <sub>3</sub>                                      | 4,47                                         |
| оксид                  | CsNO <sub>3</sub>                                     | 3,69                                         |
| пероксид               | Cs <sub>2</sub> O                                     | 4,36                                         |
| перхлорат              | Cs <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                        | 4,25                                         |
| селенат                | CsClO <sub>4</sub>                                    | 3,33 (4° C)                                  |
| сульфат                | CsSeO <sub>4</sub>                                    | 4,45                                         |
| супероксид             | Cs <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                       | 4,24                                         |
| фторид                 | CsO <sub>2</sub>                                      | 3,77                                         |
| хлорат                 | CsF                                                   | 3,59                                         |
| хлорид                 | CsClO <sub>3</sub>                                    | 5,57                                         |
| цианид                 | CsCl                                                  | 3,97                                         |
|                        | CsCN                                                  | 2,93                                         |
| <b>Церий</b>           |                                                       |                                              |
| (IV) борид             | CeB <sub>4</sub>                                      | 5,74                                         |
| бромид                 | CeBr <sub>3</sub>                                     | 5,18                                         |
| карбид                 | CeC <sub>2</sub>                                      | 5,23                                         |
| иодид                  | CeI <sub>3</sub>                                      | 2,27                                         |
| (III) оксид            | Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 6,86                                         |
| (IV) оксид             | CeO <sub>2</sub>                                      | 7,3                                          |
| селенат                | Ce <sub>2</sub> (SeO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>      | 4,46                                         |
| силицид                | CeSi <sub>2</sub>                                     | 5,67 (17° C)                                 |
| (III) сульфат          | Ce <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>       | 3,91                                         |
| (IV) сульфат           | Ce(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                     | 3,91 (18° C)                                 |
| сульфид                | Ce <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                        | 5,91                                         |
| фосфат, орто-          | CePO <sub>4</sub>                                     | 5,22                                         |
| фторид                 | CeF <sub>3</sub>                                      | 6,16                                         |
| хлорид                 | CeCl <sub>3</sub>                                     | 3,92 (0° C)                                  |
| <b>Цинк</b>            |                                                       |                                              |
| антимонид              | Zn <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>                       | 6,33                                         |
| арсенид                | Zn <sub>3</sub> As <sub>2</sub>                       | 5,53                                         |
| бромид                 | ZnBr <sub>2</sub>                                     | 4,20 (25° C)                                 |
| гидроксид              | Zn(OH) <sub>2</sub>                                   | 3,05                                         |
| иодид                  | ZnI <sub>2</sub>                                      | 4,73 (25° C)                                 |
| карбонат               | ZnCO <sub>3</sub>                                     | 4,42                                         |
| нитрат                 | Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O | 2,07 (14° C)                                 |
| нитрид                 | Zn <sub>3</sub> N <sub>2</sub>                        | 6,22 (25° C)                                 |
| оксид                  | ZnO                                                   | 5,7                                          |
| селенид                | ZnSe                                                  | 5,42 (15° C)                                 |
| силикат, мета-         | ZnSiO <sub>3</sub>                                    | 3,42                                         |
| силикат, орто-         | Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                      | 4,103                                        |
| сульфат                | ZnSO <sub>4</sub>                                     | 3,74                                         |
| сульфид                | ZnS                                                   | 4,09                                         |
| (α-фаза)               |                                                       | 3,98—4,08                                    |
| (β-фаза)               |                                                       | 6,34 (15° C)                                 |
| теллурид               | ZnTe                                                  | 4,00 (15° C)                                 |
| фосфат, орто-          | Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>       | 4,55                                         |
| фосфид                 | Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>                        | 4,90                                         |
| фторид                 | ZnF <sub>2</sub>                                      | 2,91 (25° C)                                 |
| хлорид                 | ZnCl <sub>2</sub>                                     | 1,85                                         |
| цианид                 | Zn(CN) <sub>2</sub>                                   |                                              |
| <b>Цирконий</b>        |                                                       |                                              |
| борид                  | ZrB <sub>2</sub>                                      | 6,09                                         |
| гидрид                 | ZrH <sub>2</sub>                                      | 5,74                                         |
| гидроксид              | Zr(OH) <sub>4</sub>                                   | 3,25                                         |
| карбид                 | ZrC                                                   | 6,73                                         |
| нитрид                 | ZrN                                                   | 7,09                                         |
| оксид (α-фаза)         | ZrO <sub>2</sub>                                      | 5,68                                         |
| селенит                | Zr(SeO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                    | 4,3                                          |
| силикат, орто-         | ZrSiO <sub>4</sub>                                    | 4,56                                         |
| силицид                | ZrSi <sub>2</sub>                                     | 4,88 (22° C)                                 |
| сульфат                | Zr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O | 3,22 (16° C)                                 |

| Название     | Формула                                         | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| сульфид      | ZrS <sub>2</sub>                                | 3,87                                         |
| фосфид       | ZrP <sub>2</sub>                                | 4,77 (25° C)                                 |
| (IV) фторид  | ZrF <sub>4</sub>                                | 4,43                                         |
| (II) хлорид  | ZrCl <sub>2</sub>                               | 3,16 (18° C)                                 |
| (III) хлорид | ZrCl <sub>3</sub>                               | 3,00 (18° C)                                 |
| (IV) хлорид  | ZrCl <sub>4</sub>                               | 2,80                                         |
| <b>Эрбий</b> |                                                 |                                              |
| борид        | ErB <sub>2</sub>                                | 4,61                                         |
| бромид       | ErBr                                            | 4,93                                         |
| иодид        | ErI <sub>3</sub>                                | 3,28                                         |
| оксид        | Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 8,64                                         |
| сульфат      | Er <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 3,68                                         |
| сульфид      | Er <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                  | 6,21                                         |
| фторид       | ErF <sub>3</sub>                                | 7,81                                         |
| хлорид       | ErCl <sub>3</sub>                               | 4,1                                          |

## 5.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА [5, 7]

| Название         | Формула                                                     | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Азетидин         | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> N                             | 0,8465                                       |
| Азиридин         | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N                             | 0,8349 (25° C)                               |
| Анилин           | C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N                             | 1,02173                                      |
| — 2-бром-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> BrN                           | 1,578                                        |
| — 3-бром-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> BrN                           | 1,5793                                       |
| — 4-бром-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> BrN                           | 1,4970 (100° C)                              |
| — N-метил-       | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N                             | 0,98912                                      |
| — 2-метил-       | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N                             | 0,99843                                      |
| — 3-метил-       | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N                             | 0,98912                                      |
| — 4-метил-       | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N                             | 0,9619                                       |
| — 2-метокси-     | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> NO                            | 1,0923                                       |
| — 3-метокси-     | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> NO                            | 1,096                                        |
| — 4-метокси-     | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> NO                            | 1,071 (57° C)                                |
| — 2-нитро-       | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 1,442 (15° C)                                |
| — 3-нитро-       | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 1,1747 (160° C)                              |
| — 4-нитро-       | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 1,424                                        |
| — 2-фтор-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> FN                            | 1,1478                                       |
| — 3-фтор-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> FN                            | 1,1580 (17,5° C)                             |
| — 4-фтор-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> FN                            | 1,1725                                       |
| — 2-хлор-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ClN                           | 1,21251                                      |
| — 3-хлор-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ClN                           | 1,217                                        |
| — 4-хлор-        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ClN                           | 1,175 (70° C)                                |
| Арабиноза (α, β) | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>               | 1,585                                        |
| Ацетальдегид     | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O                             | 0,7834                                       |
| — трибром-       | Br <sub>3</sub> C <sub>2</sub> HO                           | 2,665 (25° C)                                |
| — трихлор-       | Cl <sub>3</sub> C <sub>2</sub> HO                           | 1,5121                                       |
| Бензальдегид     | C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O                             | 1,0447                                       |
| — , оксим-       | C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO                            | 1,111                                        |
| — 2-гидроксн-    | C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                | 1,1674                                       |
| — 4-гидроксн-    | C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                | 1,129 (130° C)                               |
| — 2-нитро-       | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>3</sub>               | 1,2844 (50° C)                               |
| — 3-нитро-       | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>3</sub>               | 1,2792                                       |
| — 2-фтор-        | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> FO                            | 1,16 (15° C)                                 |
| — 3-фтор-        | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> FO                            | 1,176 (24° C)                                |
| — 4-фтор-        | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> FO                            | 1,181                                        |
| — 2-хлор-        | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> ClO                           | 1,2483                                       |
| — 3-хлор-        | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> ClO                           | 1,2410                                       |

| Название                  | Формула          | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------|------------------|-------------------------------------------------|
| — 4-хлор-<br>Бензиламин   | $C_7H_5ClO$      | 1,196 (61° C)                                   |
| Бензо (с) изоксазол       | $C_7H_5N$        | 0,9813                                          |
| Бензойная кислота         | $C_7H_5NO$       | 1,1827                                          |
| —, азид                   | $C_7H_5O_2$      | 1,2659 (15° C)                                  |
| —, амид                   | $C_7H_5ON_3$     | 1,1680 (35° C)                                  |
| —, бромангидрид           | $C_7H_5ON$       | 1,0792 (130° C)                                 |
| —, нитрил                 | $C_7H_5OBr$      | 1,5461                                          |
| —, фторангидрид           | $C_7H_5N$        | 1,0052                                          |
| —, хлорангидрид           | $C_7H_5OF$       | 1,155                                           |
| — 2-амино-                | $C_7H_5OCl$      | 1,212                                           |
| — 3-амино-                | $C_7H_5NO_2$     | 1,412                                           |
| — 4-амино-                | $C_7H_5NO_2$     | 1,5104 (4° C)                                   |
| — 3-бром-                 | $C_7H_5NO_2$     | 1,374 (25° C)                                   |
| — 4-бром-                 | $C_7H_5BrO_2$    | 1,845                                           |
| — 2-гидроксид-            | $C_7H_5BrO_2$    | 1,894                                           |
| — 4-гидроксид-            | $C_7H_5O_3$      | 1,443                                           |
| — 2,3-дигидроксид-        | $C_7H_5O_3$      | 1,482 (25° C)                                   |
| — 2-нитро-                | $C_7H_5O_4$      | 1,542                                           |
| — 3-нитро-                | $C_7H_5NO_4$     | 1,575                                           |
| — 2-фтор-                 | $C_7H_5NO_4$     | 1,494                                           |
| — 3-фтор-                 | $C_7H_5FO_2$     | 1,460 (25° C)                                   |
| — 4-фтор-                 | $C_7H_5FO_2$     | 1,474 (25° C)                                   |
| — 2-хлор-                 | $C_7H_5FO_2$     | 1,479 (25° C)                                   |
| — 3-хлор-                 | $C_7H_5ClO_2$    | 1,544                                           |
| Бензол                    | $C_7H_5ClO_2$    | 1,496 (25° C)                                   |
| — азидо —                 | $C_6H_6$         | 1,0880                                          |
| — 1, азидо-3-метил-       | $C_6H_5N_3$      | 1,0709 (22° C)                                  |
| — 1, азидо-4-метил-       | $C_7H_5N_3$      | 1,0527 (22° C)                                  |
| — бром-                   | $C_7H_5N_3$      | 1,0655 (25° C)                                  |
| — 1-бром-2-иод-           | $C_6H_5Br$       | 1,4950                                          |
| — 1-бром-2-метил-         | $C_6H_4BrI$      | 2,2571 (25° C)                                  |
| — 1-бром-2-метоксид-      | $C_7H_5Br$       | 1,4327                                          |
| — 1-бром-2-фтор-          | $C_7H_5BrO$      | 1,5018                                          |
| — 1-бром-2-нитро-         | $C_6H_4BrNO_2$   | 1,6245 (80° C)                                  |
| — 1-бром-2-фтор-          | $C_6H_4BrF$      | 1,7038                                          |
| — 1-бром-3-фтор-          | $C_6H_4BrF$      | 1,7081                                          |
| — 1-бром-2-хлор-          | $C_6H_4BrCl$     | 1,6444                                          |
| — гексадейтеро-           | $C_6D_6$         | 0,9465                                          |
| — гексафтор-              | $C_6F_6$         | 1,612                                           |
| — 1,2-дибром-             | $C_6H_4Br_2$     | 1,9843                                          |
| — 1,3-дибром-             | $C_6H_4Br_2$     | 1,9523                                          |
| — 1,2-дибром-4-метил-     | $C_7H_6Br_2$     | 1,812                                           |
| — 1,2-дибром-4-нитро-     | $C_6H_3Br_2NO_2$ | 2,354 (8° C)                                    |
| — 1,2-диниод              | $C_6H_4I_2$      | 2,54                                            |
| — 1,2-динитро-            | $C_6H_4N_2O_4$   | 1,3119                                          |
| — 1,4-динитро-            | $C_6H_4N_2O_4$   | 1,625                                           |
| — 2,4-динитро-1-хлор-     | $C_6H_3ClN_2O_4$ | 1,4717                                          |
| — 1,3-дифтор-             | $C_6H_4F_2$      | 1,1572                                          |
| — 1,4-дифтор-             | $C_6H_4F_2$      | 1,1701                                          |
| — 1,2-дихлор-             | $C_6H_4Cl_2$     | 1,3048                                          |
| — иод-                    | $C_6H_5I$        | 1,81548                                         |
| — 1-иод-2-метил-          | $C_7H_7I$        | 1,7090                                          |
| — 1-иод-3-метил-          | $C_7H_7I$        | 1,6981                                          |
| — 1-иод-2-нитро-          | $C_6H_4INO_2$    | 1,9786 (75° C)                                  |
| — 1-иод-2 (трифторметил)- | $C_7H_4F_3I$     | 1,896 (26° C)                                   |
| — 1-иод-3 (трифторметил)- | $C_7H_4F_3I$     | 1,887                                           |
| — 1-иод-4-фтор-           | $C_6H_4FI$       | 1,9523 (15° C)                                  |
| — 1-иод-2-хлор-           | $C_6H_4ClI$      | 1,9515 (25° C)                                  |
| — метил- (толуол)         | $C_7H_8$         | 0,86694                                         |
| — 1-метил-2,3-динитро-    | $C_7H_5N_2O_4$   | 1,2625 (111° C)                                 |
| — 1-метил-2,4-динитро-    | $C_7H_5N_2O_4$   | 1,321 (70° C)                                   |

| Название                            | Формула          | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------|
| — 1-метил-2,4-дихлор-               | $C_7H_6Cl_2$     | 1,2459                                          |
| — 2-метил-1,3-дихлор-               | $C_7H_6Cl_2$     | 1,2686                                          |
| — 1-метил-2-нитро-                  | $C_7H_5NO_2$     | 1,16296                                         |
| — 1-метил-2-нитро-<br>4-хлор-       | $C_7H_6ClNO_2$   | 1,256 (80° C)                                   |
| — 1-метил-2,3,4-три-<br>нитро-      | $C_7H_5N_3O_6$   | 1,62                                            |
| — 1-метил-2-фтор-                   | $C_7H_7F$        | 1,003                                           |
| — 1-метил-3-фтор-                   | $C_7H_7F$        | 0,9974                                          |
| — 1-метил-2-хлор-                   | $C_7H_7Cl$       | 1,0826                                          |
| — метоксид                          | $C_7H_8O$        | 0,99402                                         |
| — 1-метокси-2,3-динитро-            | $C_7H_6N_2O_5$   | 1,524                                           |
| — 1-метокси-2-нитро-                | $C_7H_7NO_3$     | 1,2540                                          |
| — 1-метокси-2-фтор-                 | $C_7H_7FO$       | 1,1293 (17,5° C)                                |
| — 1-метокси-2-хлор-                 | $C_7H_7ClO$      | 1,1911                                          |
| — 1-нитро-2,3-дихлор-               | $C_6H_3Cl_2NO_2$ | 1,721 (14° C)                                   |
| — нитропентахлор-                   | $C_6Cl_5NO_2$    | 1,718 (25° C)                                   |
| — 1-нитро-2-фтор-                   | $C_6H_4FNO_2$    | 1,3289                                          |
| — 1-нитро-2-хлор-                   | $C_6H_4ClNO_2$   | 1,348 (45° C)                                   |
| — пентафтор (трифтор-<br>метил)-    | $C_7F_8$         | 1,660 (25° C)                                   |
| — пентахлор-                        | $C_6HCl_5$       | 1,8342 (16,5° C)                                |
| — 1,2,3-трибром-4-метил-            | $C_7H_5Br_3$     | 2,456                                           |
| — 1,3,5-тринитро-                   | $C_6H_3N_3O_6$   | 1,76                                            |
| — трифторметил-<br>(бензотрифторид) | $C_7H_5F_3$      | 1,1886                                          |
| — 1-(трифторметил)-2-<br>-хлор-     | $C_7H_4ClF_3$    | 1,364 (25° C)                                   |
| — 1,2,4-трихлор-                    | $C_6H_3Cl_3$     | 1,4542                                          |
| — фтор-                             | $C_6H_5F$        | 1,0225                                          |
| — (фторметил)-                      | $C_7H_7F$        | 1,0228 (25° C)                                  |
| — 1-фтор-2-(трифтор-<br>метил)-     | $C_7H_4F_4$      | 1,293 (26° C)                                   |
| — 1-фтор-2-(трихлор-<br>метил)-     | $C_7H_4Cl_3F$    | 1,4523 (18,6° C)                                |
| — 1-фтор-2-хлор-                    | $C_6H_4ClF$      | 1,2233 (30° C)                                  |
| — 1-фтор-3-хлор-                    | $C_6H_4ClF$      | 1,221 (25° C)                                   |
| — 1-фтор-2-(хлорметил)-             | $C_7H_6ClF$      | 1,2162 (24° C)                                  |
| — хлор-                             | $C_6H_5C$        | 1,10630                                         |
| — 1-хлор-2-(трихлорме-<br>тил)-     | $C_7H_4Cl_4$     | 1,5187                                          |
| — 1-хлор-2-(хлорметил)-             | $C_7H_6Cl_2$     | 1,2743                                          |
| Бензолсульфоная кнс-<br>лота        | $C_7H_6Cl_2$     | 1,2743                                          |
| —, метиловый эфир                   | $C_7H_8O_3S$     | 1,2734 (17° C)                                  |
| —, фторангидрид                     | $C_6H_5FO_2S$    | 1,3286                                          |
| —, хлорангидрид                     | $C_6H_5ClO_2S$   | 1,3766 (25° C)                                  |
| 1,2,3-Бензолтриол                   | $C_6H_6O_3$      | 1,453                                           |
| Бензолтиазол                        | $C_6H_5NS$       | 1,2460                                          |
| — 2-хлор-                           | $C_7H_4ClNS$     | 1,3715                                          |
| 1,4-Бензохинон                      | $C_6H_4O_2$      | 1,318                                           |
| — 2-метил-                          | $C_7H_6O_2$      | 1,08 (75° C)                                    |
| Бюксиран                            | $C_4H_6O_2$      | 1,1157                                          |
| 1,2-Бутадиен                        | $C_4H_6$         | 0,652                                           |
| 1,3-Бутадиен                        | $C_4H_6$         | 0,6211                                          |
| 1,2-Бутадиен, 4-бром-               | $C_4H_5Br$       | 1,4255                                          |
| 1,3-Бутадиен, 1-бром-               | $C_4H_5Br$       | 1,4174                                          |
| — 2-бром-                           | $C_4H_5Br$       | 1,397                                           |
| — 1-бром-2-метил-                   | $C_5H_7Br$       | 1,3271                                          |
| — гексафтор-                        | $C_6F_6$         | 1,553 (—20° C)                                  |
| — гексахлор-                        | $C_6Cl_6$        | 1,682                                           |
| — 1,4-дихлор-                       | $C_4H_4Cl_2$     | 1,2692                                          |
| — 2-иод-                            | $C_4H_5I$        | 1,7278                                          |

| Название                                  | Формула                                                      | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1,2-Бутадиен, 3-метил-                    | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                                | 0,6804                                          |
| 1,3-Бутадиен-2-метил-<br>(изопрен)        | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                                | 0,6805                                          |
| — 1-метокси-                              | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O                              | 0,8296                                          |
| — 2-фтор-(фторопрен)                      | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> F                              | 0,843 (4° C)                                    |
| 1,2-Бутадиен, 4-хлор-                     | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> Cl                             | 0,9891                                          |
| 1,3-Бутадиен, 1-хлор-                     | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> Cl                             | 0,9606                                          |
| — 2-хлор-(хлоропрен)                      | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> Cl                             | 0,9583                                          |
| 2,3-Бутадиен-1-ол                         | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                              | 0,9164                                          |
| Бутадинн (диацетилен)                     | C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>                                | 0,7364 (0° C)                                   |
| Бутан                                     | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>                               | 0,5788                                          |
| — 1-бром-3,3-диметил-                     | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> Br                            | 1,1556                                          |
| — 1,4-дибром-                             | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> Br <sub>2</sub>                | 1,7890                                          |
| — 1,4-диод-                               | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> I <sub>2</sub>                 | 2,349 (26° C)                                   |
| — 2,3-диметил-                            | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>                               | 0,6616                                          |
| — 2,2-диметил-3,3-ди-<br>хлор-            | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> Cl <sub>2</sub>               | 0,8767                                          |
| — 1,4-дихлор-                             | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub>                | 1,1408                                          |
| — 1-иод-                                  | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> I                              | 1,6154                                          |
| — 2-иод-                                  | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> I                              | 1,592                                           |
| — 1-иод-2-метил-                          | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> I                             | 1,5253                                          |
| — 2-метил-(изопентан)                     | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>                               | 0,6201                                          |
| — 2-метил-2-хлор-                         | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> Cl                            | 0,8653                                          |
| — 1-метокси-                              | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O                             | 0,7443                                          |
| — 1-нитро                                 | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> N               | 0,9710                                          |
| — 1-фтор-                                 | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> F                              | 0,7789                                          |
| — 1-фтор-4-хлор-                          | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> FCI                            | 1,0627 (25° C)                                  |
| — 1-хлор-                                 | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Cl                             | 0,8862                                          |
| Бутаналь                                  | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                              | 0,8040                                          |
| —, оксим                                  | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> ON                             | 0,923                                           |
| — 2-бром-                                 | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OBg                            | 1,469                                           |
| — 2,3-дихлор-                             | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> OCl <sub>2</sub>               | 1,266                                           |
| — 2-метил-                                | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,803                                           |
| — 4-метокси                               | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,942                                           |
| — 2-оксо-                                 | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                 | 1,0285                                          |
| — 4-хлор-                                 | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OCi                            | 1,107 (8,5° C)                                  |
| — 3-этоксн-                               | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,897                                           |
| Бутандиаль                                | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                 | 1,064                                           |
| Бутандиовая кислота<br>(янтарная кислота) | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>                 | 1,563                                           |
| —, диметилловый эфир                      | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>                | 1,1197                                          |
| —, динитрил                               | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>                 | 0,9867 (60° C)                                  |
| —, дихлорангидрид                         | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,3748                                          |
| —, диэтиловый эфир                        | C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>                | 1,041                                           |
| — 2-гидроксн-                             | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub>                 | 1,45                                            |
| 1,2-Бутандиол                             | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 1,0024                                          |
| Бутановая кислота<br>(масляная кислота)   | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9577                                          |
| —, амид                                   | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ON                             | 0,885 (120° C)                                  |
| —, бромангидрид                           | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OBg                            | 1,4162 (17° C)                                  |
| —, бутнловый эфир                         | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8709                                          |
| —, нитрил                                 | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> N                              | 0,7911                                          |
| —, пропиловый эфир                        | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8722                                          |
| —, фторангидрид                           | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OF                             | 0,944 (11° C)                                   |
| —, хлорангидрид                           | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OCi                            | 1,0277                                          |
| —, этнловый эфир                          | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8790                                          |
| — 2,3-диоксо-, -этиловый<br>эфир          | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>                 | 1,151 (26° C)                                   |
| — 2,2-дифтор-                             | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> F <sub>2</sub>  | 1,22 (25° C)                                    |
| — 2-метнл                                 | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9340 (25° C)                                  |
| — 2-метокси-                              | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>                | 1,0486                                          |
| — 4-метокси-                              | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>                | 1,0596                                          |
| — 2-оксо-                                 | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>                 | 1,20 (17° C)                                    |

| Название                                                          | Формула                                         | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| — 4-хлор-                                                         | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> Cl | 1,2236                                          |
| — 2-этил-                                                         | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9239                                          |
| 1-Бутанол                                                         | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O                | 0,8096                                          |
| 2-Бутанол                                                         | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O                | 0,8063                                          |
| 1-Бутанол, 2-амино-                                               | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> ON               | 0,939 (26° C)                                   |
| 2-Бутанол, 1-амино-                                               | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> ON               | 0,927 (17° C)                                   |
| 1-Бутанол, 2,2-диметил-                                           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O                | 0,8273                                          |
| 2-Бутанол, 2,3-диметил-                                           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O                | 0,8277                                          |
| 2-Бутанол, 3-иод-                                                 | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OI                | 1,7980 (15° C)                                  |
| 1-Бутанол, 2-метил-                                               | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O                | 0,8193                                          |
| 2-Бутанол, 1-нитро-                                               | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> N  | 1,1303 (25° C)                                  |
| 2-Бутанол, 1-хлор-                                                | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OCi               | 1,0738                                          |
| 2-Бутанон                                                         | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                 | 0,8054                                          |
| 2-Бутанон, 1-гидроксн-                                            | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>    | 1,026                                           |
| 2-Бутанон, 1-хлор-                                                | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OCi               | 1,085                                           |
| 1-Бутансульфононая кис-<br>лота                                   | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub> S | 1,1906 (25° C)                                  |
| 2-Бутансульфононая кис-<br>лота                                   | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub> S | 1,227 (25° C)                                   |
| 1-Бутантиол                                                       | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S                | 0,8416                                          |
| 2-Бутантиол                                                       | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S                | 0,830                                           |
| 1-Бутантиол, 2-метил-                                             | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> S                | 0,842                                           |
| 2-Бутантиол, 2-метил-                                             | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> S                | 0,812                                           |
| 1,2,4-Бутантриол                                                  | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>   | 1,02                                            |
| 1-Бутен                                                           | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>                   | 0,5951                                          |
| 2-Бутен ( <i>транс</i> )                                          | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>                   | 0,6042                                          |
| 1-Бутен, 2-бром-3-метил-                                          | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> Br                | 1,2328                                          |
| 1-Бутен, 1-бром-3-метил-                                          | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> Br                | 1,2819                                          |
| 2-Бутен, 2-метил-                                                 | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                  | 0,6623                                          |
| 2-Бутен, 2-метил-1-хлор-                                          | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> Cl                | 0,9327                                          |
| 2-Бутен, 2-метокси-                                               | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                | 0,8054 (15° C)                                  |
| 1-Бутен, 2-нитро-                                                 | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> N  | 1,0188                                          |
| 1-Бутен, октафтор-                                                | C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>                   | 1,5443 (0° C)                                   |
| 2-Бутен, октафтор-                                                | C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>                   | 1,5297 (0° C)                                   |
| 2-Бутен, 1-хлор-( <i>транс</i> )                                  | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> Cl                | 0,9205 (15° C)                                  |
| 1-Бутен, 2-этил-                                                  | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                  | 0,6894                                          |
| 2-Бутен, 1-этоксн-                                                | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O                | 0,7846                                          |
| 2-Бутеналь (кротоновый<br>альдегид)                               | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                 | 0,8495 (25° C)                                  |
| 3-Бутеналь, 2,2-диметил-                                          | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O                | 0,8184 (25° C)                                  |
| 2-Бутеналь, 2-хлор-                                               | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> OCi               | 1,1404 (23° C)                                  |
| Бутендиовая кислота<br>( <i>транс</i> ) (фумаровая<br>кислота)    | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>    | 1,625                                           |
| Бутендиовая кислота<br>( <i>цис</i> ) (малениновая кис-<br>лота)  | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>    | 1,590                                           |
| —, динитрил ( <i>транс</i> )                                      | C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> N <sub>2</sub>    | 0,9416 (111° C)                                 |
| 2-Бутен-1,4-диол ( <i>транс</i> )                                 | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>    | 1,080                                           |
| 3-Бутен-1,2-диол                                                  | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>    | 1,0466                                          |
| 1-Бутен-3-ин                                                      | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub>                   | 0,7095 (0° C)                                   |
| 2-Бутеновая кислота<br>( <i>транс</i> ) (кротоновая кис-<br>лота) | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>    | 0,973 (72° C)                                   |
| 2-Бутеновая кислота<br>( <i>цис</i> ) (изокротоновая<br>кислота)  | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>    | 1,0267                                          |
| 3-Бутеновая кислота                                               | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>    | 1,0091                                          |
| 3-Бутеновая кислота,<br>2,2-диметил-                              | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>   | 0,963                                           |
| 3-Бутеновая кислота,<br>2-хлор-                                   | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> Cl | 1,237                                           |
| 2-Бутеновая кислота,<br>2-этил-                                   | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9578 (50° C)                                  |



| Название                                           | Формула                                        | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> | Название                                     | Формула                                        | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2-Бутен-1-ол ( <i>транс</i> )<br>(протиловый эфир) | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,8532                                          | Гександиовая кислота<br>(адипиновая кислота) | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>  | 1,360 (25° C)                                   |
| 2-Бутен-1-ол ( <i>цис</i> )                        | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,8662                                          | —, диметилловый эфир                         | C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> O <sub>4</sub>  | 1,060                                           |
| 3-Бутен-1-ол                                       | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,8454                                          | —, динитрил                                  | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>   | 0,9676                                          |
| 3-Бутен-2-ол                                       | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,8413                                          | 2,5-Гександиол                               | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9610                                          |
| 3-Бутен-1-ол, 2-бром-                              | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OBr              | 1,5130                                          | 2,5-Гександион                               | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9737                                          |
| 3-Бутен-2-ол, 1-бром-                              | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OBr              | 1,5205                                          | Гексановая кислота<br>(капроновая кислота)   | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9274                                          |
| 3-Бутен-2-ол, 2,3-диме-<br>тил                     | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,8396                                          | —, метилловый эфир                           | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>  | 0,8846                                          |
| 2-Бутен-1-ол, 2-метил-                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,863 (24° C)                                   | —, нитрил                                    | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> N               | 0,8052                                          |
| 3-Бутен-2-ол, 2-метил-                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,825                                           | —, хлорангидрид                              | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> OC <sub>2</sub> | 0,9754                                          |
| 3-Бутен-1-ол, 2-хлор-                              | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OC <sub>2</sub>  | 1,1044                                          | 1-Гексанол                                   | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O               | 0,8136                                          |
| 3-Бутен-2-ол, 1-хлор-                              | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> OC <sub>2</sub>  | 1,1123                                          | 2-Гексанон                                   | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,8113                                          |
| 3-Бутен-2-он                                       | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,8459                                          | 1-Гексантиол                                 | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>                 | 0,8424                                          |
| 2-Бутен-1-тиол                                     | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> S                | 0,883 (23° C)                                   | 1,3,5-Гексатриен                             | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,7420                                          |
| 3-Бутен-1-тиол                                     | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> S                | 0,9087                                          | ( <i>транс</i> )                             |                                                |                                                 |
| Бутиламин                                          | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N               | 0,7414                                          | 1,3,5-Гексатриен ( <i>цис</i> )              | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,7175                                          |
| втор-Бутиламин                                     | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N               | 0,724                                           | 1-Гексен                                     | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,6731                                          |
| трет-Бутиламин                                     | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N               | 0,6598                                          | 2-Гексен ( <i>транс</i> )                    | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,6784                                          |
| Бутиламин, N, N-диме-<br>тил                       | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> N               | 0,7206                                          | 2-Гексен ( <i>цис</i> )                      | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,6869                                          |
| — N-изопропил-                                     | C <sub>7</sub> H <sub>17</sub> N               | 0,741                                           | 3-Гексен ( <i>транс</i> )                    | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,6772                                          |
| — N-метил-                                         | C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N               | 0,7377                                          | 3-Гексен ( <i>цис</i> )                      | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,6796                                          |
| — 1-метил-                                         | C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N               | 0,7424                                          | 2-Гексен, 2,5-диметил-                       | C <sub>7</sub> H <sub>13</sub>                 | 0,720                                           |
| трет-Бутилгидроперок-<br>сид                       | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>  | 0,8930                                          | 1-Гексен, 2-метил-                           | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>                 | 0,7030                                          |
| трет-Бутилгипохлорит                               | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OC <sub>2</sub>  | 0,9583                                          | 1-Гексен, 1-хлор-                            | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> Cl              | 0,8872                                          |
| Бутилзотиоцианат                                   | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NS               | 0,9546                                          | 2-Гексеналь ( <i>транс</i> )                 | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,8491                                          |
| трет-Бутилзотиоцианат                              | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NS               | 0,9187 (10° C)                                  | 1-Гексен-3-ин                                | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,7492                                          |
| Бутиленитрат                                       | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O <sub>3</sub> N | 1,0153                                          | 1-Гексен-3-ол                                | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,834                                           |
| втор-Бутиленитрат                                  | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O <sub>3</sub> N | 1,0264                                          | Гексиламин                                   | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> N               | 0,776                                           |
| Бутиленитрит                                       | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> N | 0,8823                                          | 1-Гексин                                     | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,7155                                          |
| втор-Бутиленитрит                                  | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> N | 0,8728                                          | 2-Гексин                                     | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,7315                                          |
| трет-Бутиленитрит                                  | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> N | 0,867                                           | 3-Гексин                                     | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,7236                                          |
| 1-Бутин                                            | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,6784 (0° C)                                   | Гептан                                       | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>                 | 0,68376                                         |
| 2-Бутин                                            | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,6510                                          | — 1-бром-                                    | C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> Br              | 1,140                                           |
| 1-Бутин, 3,3-диметил-                              | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,6695                                          | — 1,1-дихлор-                                | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,0008                                          |
| 2-Бутин, 1,4-диметоксн-                            | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9575                                          | — 1-иод-                                     | C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> I               | 1,3791                                          |
| — 1,4-дихлор-                                      | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>  | 1,258                                           | — перфтор-                                   | C <sub>7</sub> F <sub>16</sub>                 | 1,7333                                          |
| 1-Бутин, 3-метил-                                  | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,666                                           | — 1-хлор-                                    | C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> Cl              | 0,8758                                          |
| 1,2-Гексадиен                                      | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,7149                                          | Гептаналь                                    | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O               | 0,8495                                          |
| 1,3-Гексадиен, 5-хлор-                             | C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> Cl               | 0,9275                                          | Гептандиовая кислота                         | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>  | 1,329 (15° C)                                   |
| 2,4-Гексадиеналь                                   | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,898                                           | 1,7-Гептандиол                               | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9569 (25° C)                                  |
| 1,3-Гексадиен-5-ин                                 | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,7806                                          | 2,4-Гептандион                               | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9411 (15° C)                                  |
| 2,4-Гексадиенон                                    | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,8967                                          | Гептановая кислота                           | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>  | 0,920                                           |
| 1,4-Гексадиен-3-он                                 | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,8959                                          | 1-Гептанол                                   | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O               | 0,8219                                          |
| 1,4-Гексадин                                       | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,825 (0° C)                                    | 2-Гептанон                                   | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O               | 0,8111                                          |
| 1,5-Гексадин                                       | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,8049                                          | 1-Гептантиол                                 | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> S               | 0,8427                                          |
| Гексан                                             | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>                 | 0,6603                                          | 1-Гептен                                     | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>                 | 0,6970                                          |
| — 1-бром-                                          | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> Br              | 1,1744                                          | 1-Гептен-3-ин                                | C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,7603                                          |
| — 1,2-дибром-                                      | C <sub>4</sub> H <sub>12</sub> Br <sub>2</sub> | 1,5774                                          | 2-Гептен-4-ол                                | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O               | 0,8445                                          |
| — 1,6-диод-                                        | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> I <sub>2</sub>  | 2,03                                            | 3-Гептен-2-он ( <i>транс</i> )               | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,8496                                          |
| — 2,2-диметил-                                     | C <sub>6</sub> H <sub>18</sub>                 | 0,6953                                          | Гептиламин                                   | C <sub>7</sub> H <sub>17</sub> N               | 0,7754                                          |
| — 1,2-дихлор-                                      | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,085 (15° C)                                   | 1-Гептин                                     | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,7328                                          |
| — 1-иод-                                           | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> I               | 1,4397                                          | 2-Гептин                                     | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,7480                                          |
| — 2-метил-                                         | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>                 | 0,6787                                          | 3-Гептин                                     | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,7527                                          |
| — 1-фтор-                                          | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> F               | 0,7995                                          | 2-Гептин-1-ол                                | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,884 (27° C)                                   |
| — 1-фтор-6-хлор-                                   | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> FC <sub>2</sub> | 1,015                                           | Гидрохинон                                   | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>   | 1,358                                           |
| — 1-хлор-                                          | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> Cl              | 0,8785                                          | Глиоксаль                                    | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 1,14                                            |
| Гексаль (капроновый<br>альдегид)                   | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,8139                                          | Диаллилсульфид                               | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> S               | 0,8877 (27° C)                                  |
| 1,6-Гексаль (адипи-<br>новый альдегид)             | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>  | 1,003                                           | Диаллилсульфоксид                            | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> SO              | 1,0261                                          |
|                                                    |                                                |                                                 | Диаллилсульфон                               | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> SO <sub>2</sub> | 1,1215                                          |
|                                                    |                                                |                                                 | Дибутиламин                                  | C <sub>8</sub> H <sub>19</sub> N               | 0,7670                                          |
|                                                    |                                                |                                                 | Дибутилловый эфир                            | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O               | 0,7689                                          |
|                                                    |                                                |                                                 | Ди-трет-бутилпероксид                        | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>  | 0,796                                           |

| Название                            | Формула                                                       | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Дибутилсульфид                      | C <sub>18</sub> H <sub>18</sub> S                             | 0,8386                                          |
| Дивиниловый эфир                    | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                               | 0,773                                           |
| Дивинилсульфид                      | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> S                               | 0,9174 (15° C)                                  |
| Диизопропиламин                     | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> N                              | 0,7163                                          |
| N, N'-Диизопропилгидразин           | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>                 | 0,7929                                          |
| Диизопропилдисульфид                | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S <sub>2</sub>                  | 0,9435                                          |
| Диизопропиловый эфир                | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O                               | 0,7241                                          |
| Диизопропилсульфид                  | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S                               | 0,8142                                          |
| Диметиламин                         | C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N                               | 0,6804 (0° C)                                   |
| N, N-Диметилгидразин                | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>                  | 0,7911                                          |
| Диметилдисульфид                    | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>                  | 1,0647                                          |
| Диметилдихлоргерманий               | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> GeCl <sub>2</sub>               | 1,492                                           |
| Диметилсульфат                      | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> S                | 1,3332 (15° C)                                  |
| Диметилсульфид                      | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S                               | 0,8483                                          |
| Диметилсульфит                      | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub> S                | 1,2129                                          |
| Диметилсульфоксид                   | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> OS                              | 1,1014                                          |
| 1,3-Диоксан                         | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                  | 1,0319                                          |
| 1,3-Диоксолан                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                  | 1,060                                           |
| — 2-метил-                          | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                  | 0,9811                                          |
| 1,3-Диоксолан-2-он (этиленкарбонат) | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>                  | 1,3218 (39° C)                                  |
| — 4-метил-                          | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>                  | 1,2057                                          |
| Дипропилдисульфид                   | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> S <sub>2</sub>                 | 0,9599                                          |
| Дипропиловый эфир                   | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O                              | 0,736                                           |
| Дипропилсульфат                     | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub> S               | 1,1064                                          |
| Дипропилсульфид                     | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> S                              | 0,8377                                          |
| Дипропилсульфоксид                  | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> OS                             | 0,9654                                          |
| Дипропилсульфон                     | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub> S               | 1,0278 (50° C)                                  |
| 1,3-Дитиолан                        | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>                  | 1,259 (17° C)                                   |
| Диэтиламин                          | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N                              | 0,7059                                          |
| N, N-Диэтилгидразин                 | C <sub>4</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub>                 | 0,8004                                          |
| Диэтилдисульфид                     | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S <sub>2</sub>                 | 0,9931                                          |
| Диэтиловый эфир (этиловый эфир)     | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O                              | 0,71378                                         |
| — 1,2-дибром-                       | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> OBBr <sub>2</sub>               | 1,7315                                          |
| — 1,1-дихлор-                       | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> OC <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,1285                                          |
| — 1-хлор-                           | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> OCl                             | 0,9493                                          |
| — 2-хлор-                           | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> OCl                             | 0,9894                                          |
| Диэтилпероксид (перекись этила)     | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,8240                                          |
| Диэтилсульфат                       | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> S               | 1,1842 (15° C)                                  |
| Диэтилсульфид                       | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S                              | 0,8362                                          |
| Диэтилсульфит                       | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub> S               | 1,0829                                          |
| Изобутиламин                        | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N                              | 0,7346                                          |
| Изобутилизотиоцианат                | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NS                              | 0,9638 (14° C)                                  |
| Изоксазол                           | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> NO                              | 1,078                                           |
| Изопентиламин                       | C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N                              | 0,7491                                          |
| Изопентилнитрат                     | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> O <sub>3</sub> N               | 0,9961 (22° C)                                  |
| Изопропенилизотиоцианат             | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> ON                              | 0,8776                                          |
| Имидазол                            | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>                  | 1,0303 (101° C)                                 |
| — 1-метил-                          | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>                  | 1,0325                                          |
| Инден                               | C <sub>9</sub> H <sub>8</sub>                                 | 0,9957                                          |
| Индол                               | C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N                               | 1,0718 (56° C)                                  |
| Индолин                             | C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> N                               | 1,069                                           |
| Кетен                               | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O                               | 1,45 · 10 <sup>-3</sup>                         |
| —, диэтилацеталь                    | C <sub>4</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,8776 (25° C)                                  |
| Ксилоза                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>                 | 1,525                                           |
| Малоновая кислота                   | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>                  | 0,619 (16° C)                                   |
| —, диметиловый эфир                 | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>                  | 1,1528                                          |
| —, динитрил                         | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> N <sub>2</sub>                  | 1,1910                                          |
| —, дихлорангидрид                   | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>  | 1,4509                                          |
| —, диэтиловый эфир                  | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>                 | 1,0551                                          |

| Название                       | Формула                                       | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| — метил- (изоянтарная кислота) | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>  | 1,455                                           |
| Метан                          | CH <sub>4</sub>                               | 0,466 (—164° C)                                 |
| — азидо-                       | CH <sub>3</sub> N <sub>3</sub>                | 0,869 (8° C)                                    |
| — бром-                        | CH <sub>3</sub> Br                            | 1,6755                                          |
| — бромдифтор-                  | CHBrF <sub>2</sub>                            | 1,55                                            |
| — бромдихлор-                  | CHBrCl <sub>2</sub>                           | 1,98 (16° C)                                    |
| — бромнод-                     | CH <sub>2</sub> BrI                           | 2,926 (17° C)                                   |
| — бромтринитро-                | CO <sub>6</sub> N <sub>3</sub> Br             | 2,0313                                          |
| — бромтрихлор-                 | CBBrCl <sub>3</sub>                           | 2,0122                                          |
| — бромфторхлор-                | CHBrCFIF                                      | 1,9771 (0° C)                                   |
| — дибром- (бромистый метилен)  | CH <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>               | 2,4970                                          |
| — дибромдихлор-                | CBBr <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>             | 1,42 (25° C)                                    |
| — дибромфтор-                  | CHBr <sub>2</sub> F                           | 2,421                                           |
| — дибромхлор-                  | CHBr <sub>2</sub> Cl                          | 2,451                                           |
| — динод- (нодистый метилен)    | CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>                | 3,3240                                          |
| динодфтор-                     | CHFI <sub>2</sub>                             | 3,1969 (26° C)                                  |
| — динитрохлор-                 | CHCl(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>           | 1,6123                                          |
| — дифенил-                     | C <sub>13</sub> H <sub>12</sub>               | 1,0060                                          |
| — дифтор-                      | CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>                | 0,909                                           |
| (фтористый метилен)            |                                               |                                                 |
| — дифтордихлор- (фреон-12)     | CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>               | 1,64 (—73° C)                                   |
| — дифторхлор- (фреон-22)       | CHClF <sub>2</sub>                            | 1,4909 (—69° C)                                 |
| — дихлор- (хлористый метилен)  | CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>               | 1,3266                                          |
| — иод- (нодистый метил)        | CH <sub>3</sub> I                             | 2,279                                           |
| — иоддифтор-                   | CHF <sub>2</sub> I                            | 3,238 (—19° C)                                  |
| — иоддихлор                    | CHCl <sub>2</sub> I                           | 2,392                                           |
| — иодтрихлор-                  | CCl <sub>3</sub> I                            | 2,355                                           |
| — иодфтор-                     | CH <sub>2</sub> FI                            | 2,366                                           |
| — иодхлор-                     | CH <sub>2</sub> CI                            | 2,422                                           |
| — нитро-                       | CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>               | 1,1382                                          |
| — нитротрихлор- (хлорпикрин)   | CHCl <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>             | 1,6566                                          |
| — нитрофенил- (α-нитротолуол)  | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub> | 1,1598                                          |
| — нитрохлор-                   | CH <sub>2</sub> ClNO <sub>2</sub>             | 1,466 (15° C)                                   |
| — тетрабром- (α-фаза)          | CBBr <sub>4</sub>                             | 2,9609 (100° C)                                 |
| (β-фаза)                       |                                               | 3,273                                           |
| — тетраиод-                    | CI <sub>4</sub>                               | 4,23                                            |
| — тетранитро-                  | C(NO <sub>2</sub> ) <sub>4</sub>              | 1,6380                                          |
| — тетрафтор-                   | CF <sub>4</sub>                               | 1,619 (—129,8° C)                               |
| — тетрахлор-                   | CCl <sub>4</sub>                              | 1,5940                                          |
| — трибром- (бромформ)          | CHBr <sub>3</sub>                             | 2,8899                                          |
| — трибромнитро-                | CBBr <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>             | 2,7930                                          |
| — трибромфтор-                 | CBBr <sub>3</sub> F                           | 2,7648                                          |
| — трибромхлор-                 | CBBr <sub>3</sub> Cl                          | 2,71 (15° C)                                    |
| — тринод- (нодоформ)           | CH <sub>3</sub> I                             | 4,008                                           |
| — тринитро- (нитроформ)        | CH(NO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>             | 1,648 (13° C)                                   |
| — тринитрохлор-                | CCl(NO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>            | 1,6769                                          |
| — трифтор- (фтороформ)         | CHF <sub>3</sub>                              | 1,52 (—100° C)                                  |
| — трихлор- (хлороформ)         | CHCl <sub>3</sub>                             | 1,4832                                          |
| — фтор- (фтористый метил)      | CH <sub>3</sub> F                             | 0,5786                                          |
| — фтордихлор-                  | CHCl <sub>2</sub> F                           | 1,405 (9° C)                                    |
| — фтортрихлор- (фреон-11)      | CCl <sub>3</sub> F                            | 1,4995 (15° C)                                  |
| — хлор- (хлористый метил)      | CH <sub>3</sub> Cl                            | 0,9159                                          |

| Название                                    | Формула                                       | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> | Название                                  | Формула                                                      | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Метанол                                     | CH <sub>4</sub> O                             | 0,7914                                          | — 1-бром-                                 | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> Br                            | 1,2182                                          |
| Метанол- <i>D</i>                           | CH <sub>3</sub> OD                            | 0,8127                                          | — 3-бром-3-метил-                         | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> Br                            | 1,1835                                          |
| Метансульфоновая кислота                    | CH <sub>3</sub> OS                            | 1,4812                                          | — 1,5-диiod-                              | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> I <sub>2</sub>                | 2,1903 (15° C)                                  |
| Метантиол (метилмеркаптан)                  | CH <sub>4</sub> S                             | 0,8665                                          | — 2,2-диметил-                            | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>                               | 0,6739                                          |
| Метиламин                                   | CH <sub>5</sub> N                             | 0,6628                                          | — 1,2-дихлор-                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> Cl <sub>2</sub>               | 1,0872                                          |
| Метилгидразин                               | CH <sub>6</sub> N <sub>2</sub>                | 0,8733                                          | — 3,3-диэтил-                             | C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>                               | 0,7536                                          |
| <i>N</i> -Метилгидроксиламин                | CH <sub>5</sub> ON                            | 1,0003                                          | — 1-iod-                                  | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> I                             | 1,5161                                          |
| Метилгидропероксид                          | CH <sub>4</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9967 (15° C)                                  | — 2-метил-                                | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>                               | 0,6532                                          |
| Метилизотиоцианат                           | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NS              | 1,0691 (37° C)                                  | — 1-метокси-                              | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O                             | 0,7606                                          |
| Метилизоцианат                              | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ON              | 0,9744 (15° C)                                  | — 1-нитро-                                | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>               | 0,9525                                          |
| Метилнитрат                                 | CH <sub>3</sub> O <sub>3</sub> N              | 1,2075                                          | — 1-фтор-                                 | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> F                             | 0,7907                                          |
| Метилинитрит                                | CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> N              | 0,991                                           | — 1-хлор-                                 | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> Cl                            | 0,8818                                          |
| Метилтиоцианат                              | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NS              | 1,0678 (25° C)                                  | — 3-этил-                                 | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>                               | 0,6982                                          |
| Метилтрихлоргерманий                        | CH <sub>3</sub> GeCl <sub>3</sub>             | 1,73 (24,5° C)                                  | Пентаналь (валериановый альдегид)         | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,8095                                          |
| Морфолин                                    | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ON              | 1,0005                                          | Пентандиовая кислота (глутаровая кислота) | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>                 | 1,192 (106° C)                                  |
| Муравьиная кислота                          | CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                | 1,22                                            | —, диметилловый эфир                      | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>                | 1,0876                                          |
| —, аллиловый эфир                           | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>  | 0,946                                           | —, динитрил                               | C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>                 | 0,9911 (15° C)                                  |
| —, амид (формамид)                          | CH <sub>3</sub> ON                            | 1,1334                                          | —, дихлорангидрид                         | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,3241                                          |
| —, бутиловый эфир                           | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub> | 0,8265                                          | 1,2-Пентадиол                             | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9802                                          |
| —, гексиловый эфир                          | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub> | 0,8813                                          | 2,3-Пентадиол                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9565                                          |
| —, гептиловый эфир                          | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub> | 0,8784                                          | Пентановая кислота (валериановая кислота) | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9391                                          |
| —, изобутиловый эфир                        | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub> | 0,8854                                          | —, метиловый эфир                         | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8947                                          |
| —, изопентиловый эфир                       | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub> | 0,8857                                          | —, нитрил                                 | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> N                              | 0,7992                                          |
| —, изопропиловый эфир                       | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>  | 0,8774                                          | —, хлорангидрид                           | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> OCi                            | 1,0155 (15° C)                                  |
| —, метиловый эфир                           | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9705                                          | —, этиловый эфир                          | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8770                                          |
| —, нитрил (водород цианстый)                | CHN                                           | 0,6876                                          | — 2-бром-                                 | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> Br              | 1,381                                           |
| —, пентиловый эфир                          | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub> | 0,8853                                          | — 2-метил-                                | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9230                                          |
| —, пропиловый эфир                          | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9039                                          | — 4-оксо-(левулиновая кислота)            | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>                 | 1,1335                                          |
| —, фторангидрид                             | CHOF                                          | 1,099 (0° C)                                    | — 3-хлор-                                 | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,1484                                          |
| —, этиловый эфир                            | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>  | 0,9168                                          | 1-Пентанол (амиловый спирт)               | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O                             | 0,8144                                          |
| Надуксусная кислота (гидроперекись ацетила) | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>  | 1,226 (15° C)                                   | 2-Пентанон                                | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,8089                                          |
| Нафталин                                    | C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>                | 1,0253                                          | 1-Пентантиол                              | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> S                             | 0,8421                                          |
| Неопентиламин                               | C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N              | 0,7455                                          | 1-Пентен                                  | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                               | 0,6405                                          |
| Норборнадиен                                | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>                 | 0,9064                                          | 2-Пентен ( <i>транс</i> )                 | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                               | 0,6482                                          |
| Оксетан                                     | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O               | 0,9001                                          | 2-Пентен ( <i>цис</i> )                   | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                               | 0,6556                                          |
| Оксетан-2-он                                | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>  | 1,146                                           | 1-Пентен, 1-бром-                         | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> Br                             | 1,2391                                          |
| Оксиран                                     | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O               | 0,8971 (0° C)                                   | 1-Пентен, декафтор-                       | C <sub>5</sub> F <sub>10</sub>                               | 1,2571 (25° C)                                  |
| — винил-                                    | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O               | 0,8745                                          | 2-Пентен, 2,3-диметил-                    | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>                               | 0,7227                                          |
| — гидроксиметил-                            | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>  | 1,1143 (25° C)                                  | 1-Пентен, 2-метил-                        | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                               | 0,6799                                          |
| — 2,2-диметил-                              | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O               | 0,8112                                          | 2-Пентен, 2-метил-                        | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                               | 0,6863                                          |
| — метил-                                    | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O               | 0,8311                                          | 1-Пентен, 3-хлор-                         | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> Cl                             | 0,8988                                          |
| — 2,3-тетраметил-                           | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O              | 0,9718                                          | 1-Пентен, 2-этил-                         | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>                               | 0,7079                                          |
| — фенил-                                    | C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O               | 1,0592                                          | 2-Пентеналь                               | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O                              | 0,860                                           |
| — хлорметил-                                | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OCi             | 1,180                                           | 1-Пентен-3-ин (пирилен)                   | C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>                                | 0,7401                                          |
| — этил-                                     | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O               | 0,837 (17° C)                                   | 2-Пентеновая кислота                      | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9809                                          |
| Оксиранкарбоновая кислота, этиловый эфир    | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>  | 1,085                                           | 1-Пентен-3-ол                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,8395                                          |
| Октан                                       | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>                | 0,8756                                          | 4-Пентен-1-ол                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,8457                                          |
| Ортомуравьиная кислота, триметиловый эфир   | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub> | 0,9676                                          | 4-Пентен-2-ол                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,8367                                          |
| Ортоугольная кислота, тетраэтиловый эфир    | C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub> | 0,9186                                          | Пентиламин                                | C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N                             | 0,7561                                          |
| Ортоуксусная кислота, триметиловый эфир     | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub> | 0,9438 (25° C)                                  | <i>mpm</i> -Пентиламин                    | C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N                             | 0,7320                                          |
| 1,2-Пентадиен                               | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                 | 0,6926                                          | Пентилнитрит                              | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> O <sub>2</sub> N              | 0,8958                                          |
| 1,4-Пентадиен-3-он                          | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O               | 0,8811                                          | 1-Пентин                                  | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                                | 0,6901                                          |
| 1,3-Пентадин                                | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub>                 | 0,7909                                          | 1-Пентин, 5-хлор-                         | C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> Cl                             | 0,7107                                          |
| Пентаметилендиамин                          | C <sub>5</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> | 0,867 (25° C)                                   | 2-Пентин                                  | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                                | 0,968                                           |
| Пентан                                      | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>                | 0,6262                                          | 1-Пентин, 5-хлор-                         | C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,978                                           |
|                                             |                                               |                                                 | 2-Пентиновая кислота                      | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,8859                                          |
|                                             |                                               |                                                 | 1-Пентин-3-ол                             | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,8698                                          |
|                                             |                                               |                                                 | Пиперидин                                 | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> N                             | 0,8159                                          |
|                                             |                                               |                                                 | — 1-метил-                                | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> N                             | 1,0631                                          |
|                                             |                                               |                                                 | — 1-нитрозо-                              | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> NO                            |                                                 |

Продолжение табл. 5.4

| Название                                            | Формула                                       | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Пиразин                                             | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>  | 1,0254 (60° C)                                  |
| Пиразол                                             | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>  | 1,001 (99,8° C)                                 |
| 2-Пиразолин                                         | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>  | 1,020 (17° C)                                   |
| 2H-Пиран, 3,4-дигидро-                              | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O               | 0,9261                                          |
| 2H-Пиран-2-он<br>(α-пирон)                          | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>  | 1,1972                                          |
| 4H-Пиран-4-он<br>(γ-пирон)                          | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>  | 1,190                                           |
| Пиран-2-он, тетрагидро-                             | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>  | 1,0794                                          |
| Придазин                                            | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>  | 1,111                                           |
| 2-Придиламин,<br>N, N-диметил-                      | C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> | 1,0192                                          |
| 2-Придиламин,<br>N-метил-                           | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>  | 1,0707                                          |
| Пиридин                                             | C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N               | 0,9835                                          |
| — 2-ацетил-                                         | C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> NO              | 1,0776 (15° C)                                  |
| — 2-бром-                                           | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> BrN             | 1,6377                                          |
| — 2-винил-                                          | C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> N               | 0,9757                                          |
| — 2,3-диметил-                                      | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N               | 0,9453                                          |
| — 2-метил-                                          | C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N               | 0,9443                                          |
| — 2-метокси-                                        | C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> NO              | 1,0457                                          |
| — 1,2,3,6-тетрагидро-                               | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> N               | 0,9153                                          |
| — 2-хлор-                                           | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> ClN             | 1,2029                                          |
| — 2-этил-                                           | C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N               | 0,9304                                          |
| Пиридин-4-карбальдегид<br>(изоникотиновый альдегид) | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO              | 1,1339 (25° C)                                  |
| Пиримидин                                           | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub>  | 1,1293                                          |
| Пиррол                                              | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N               | 0,9698                                          |
| — 1-ацетил-                                         | C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> NO              | 1,044                                           |
| — 2,4-диметил-                                      | C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> N               | 0,9208                                          |
| — 2-изопропил-                                      | C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> N              | 0,906 (25° C)                                   |
| — 2-метил-                                          | C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> N               | 0,9295                                          |
| — 1-пропил-                                         | C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> N              | 0,8833                                          |
| — 1-этил-                                           | C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> N               | 0,9009                                          |
| Пирролидин                                          | C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> N               | 0,8586                                          |
| — 1-метил-                                          | C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> N              | 0,8188                                          |
| — 1-пропил-                                         | C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> N              | 0,8172                                          |
| — 1-этил-                                           | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> N              | 0,8263                                          |
| 2-Пирролидон                                        | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NO              | 1,120                                           |
| — 1,5-диметил-                                      | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO             | 1,0242                                          |
| — 1-метил-                                          | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> NO              | 1,0328                                          |
| 3-Пирролин                                          | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> N               | 0,9097                                          |
| Пропан                                              | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>                 | 0,5853 (—45° C)                                 |
| — 1-бром-                                           | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> Br              | 1,3537                                          |
| — 2-бром-                                           | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> Br              | 1,3140                                          |
| — 1-винилокси-                                      | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O              | 0,7680                                          |
| — 1,2-диацетоксн-                                   | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub> | 1,059                                           |
| — 1,1-дибром-                                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> Br <sub>2</sub> | 1,982                                           |
| — 1,3-динод-                                        | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> I <sub>2</sub>  | 2,5755                                          |
| — 2,3-диметил (неопентан)                           | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>                | 0,6135                                          |
| — 1,1-дихлор-                                       | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,1321                                          |
| — 1-нод-                                            | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> I               | 1,7489                                          |
| — 2-метил-(изобутан)                                | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>                | 0,551 (25° C)                                   |
| — 1-метоксн-                                        | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O              | 0,738                                           |
| — 1-нитро-                                          | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub> | 0,9955 (25° C)                                  |
| — 1,2,3-трибром-                                    | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> Br <sub>3</sub> | 2,4209                                          |
| — 1,2,3-трихлор-                                    | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> | 1,3889                                          |
| — 1-фтор-                                           | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> F               | 0,7956                                          |
| — 1-хлор-                                           | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> Cl              | 0,8904                                          |
| — 1-этоксн-                                         | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O              | 0,7386                                          |
| Пропаналь (пропионовый альдегид)                    | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O               | 0,8058                                          |
| — , днэтилацеталь-                                  | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub> | 0,8232                                          |

Продолжение табл. 5.4

| Название                                    | Формула                                                      | Плотность<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| — , оксим-                                  | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> ON                             | 0,9258                                         |
| — 2,-бром-                                  | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OBr                            | 1,592                                          |
| — 2,3-дибром-                               | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> OBr <sub>2</sub>               | 2,198 (16° C)                                  |
| — 2,2-диметил-                              | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,7832                                         |
| — 2,3-дихлор-                               | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> OCl <sub>2</sub>               | 1,40                                           |
| — 2-метил-                                  | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                              | 0,7904                                         |
| — 2-оксо-                                   | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>                 | 1,0455 (24° C)                                 |
| — 2-хлор-                                   | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OCl                            | 1,182 (15° C)                                  |
| 1,2-Пропанднол (пропиленгликоль)            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 1,0361                                         |
| 1,2-Пропандиол, 3-меркапто-(тиоглицерин)    | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> S               | 1,2455                                         |
| 1,3-Пропандиол, 2-метоксн-                  | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>                | 1,124 (25° C)                                  |
| 1,3-Пропандиол, 2-хлор-                     | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,3219                                         |
| 1,3-Пропандитиол                            | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> S <sub>2</sub>                 | 1,0783                                         |
| Пропановая кислота<br>(пропионовая кислота) | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,993                                          |
| — , ангидрид                                | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>                | 1,0110                                         |
| — , бромангидрид                            | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OBr                            | 1,521 (16° C)                                  |
| — , бутиловый эфир                          | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8754                                         |
| — , изобутиловый эфир                       | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8687                                         |
| — , изопропильный эфир                      | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8660                                         |
| — , метиловый эфир                          | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9150                                         |
| — , нитрил                                  | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N                              | 0,7818                                         |
| — , пропиловый эфир                         | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8809                                         |
| — , фторангидрид-                           | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OF                             | 0,972 (15° C)                                  |
| — , хлорангидрид-                           | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OCl                            | 1,0646                                         |
| — , этиловый эфир                           | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9359                                         |
| — 2-ацетокси-                               | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>                 | 1,1758                                         |
| — 2-бром-                                   | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> Br              | 1,70                                           |
| — 2,2-дихлор-                               | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,389 (23° C)                                  |
| — 2-иод-                                    | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> I               | 2,073                                          |
| — 3-меркапто-                               | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> S               | 1,218                                          |
| — 2-метил-(изомасляная кислота)             | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9682                                         |
| — 2-оксо-(пировиноградная кислота)          | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>                 | 1,2272                                         |
| — 3-фтор-                                   | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> F               | 1,1815                                         |
| — 2-хлор-                                   | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,2585                                         |
| 1-Пропанол                                  | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O                              | 0,8035                                         |
| 2-Пропанол (изопропиловый спирт)            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O                              | 0,7855                                         |
| 2-Пропанол, 1-амино-                        | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> ON                             | 0,9611                                         |
| 2-Пропанол, 1-бром-                         | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OBr                            | 1,5585 (30° C)                                 |
| 1-Пропанол, 2,3-дибром-                     | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> OBr <sub>2</sub>               | 2,0739                                         |
| 2-Пропанол, 2,2-диметил-                    | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O                             | 0,812                                          |
| 2-Пропанол, 1,3-диметоксн-                  | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>                | 1,0085                                         |
| 1-Пропанол, 2,3-дихлор-                     | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub>                | 1,3506 (25° C)                                 |
| 2-Пропанол, 2-метил-(мет-бутиловый спирт)   | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O                             | 0,7887                                         |
| 1-Пропанол, 2-нитро-                        | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O <sub>3</sub> N               | 1,1841 (25° C)                                 |
| 1-Пропанол, 2-хлор-                         | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OCl                            | 1,103                                          |
| 2-Пропанол, 1-хлор-                         | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OCl                            | 1,115                                          |
| 1-Пропанол, 2-этоксн-                       | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O                             | 0,9044                                         |
| 2-Пропанол, 1-этоксн-                       | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O                             | 0,9028                                         |
| 2-Пропанон (ацетон)                         | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O                              | 0,7899                                         |
| — , азин                                    | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub>                | 0,8389                                         |
| — , гексахлор                               | C <sub>3</sub> OCl <sub>6</sub>                              | 1,7444 (12° C)                                 |
| — , 1-гидроксн (ацетол)                     | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                 | 1,0824                                         |
| — , 1-хлор-                                 | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> OCl                            | 1,15                                           |
| 1-Пропансульфоновая кислота, хлорангидрид   | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> SCI             | 1,2826 (15° C)                                 |

| Название                                              | Формула                                        | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2-Пропансульфоновая кислота                           | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>3</sub> S | 1,187 (25° C)                                   |
| 1-Пропантиол (пропилмеркаптан)                        | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> S                | 0,8411                                          |
| 2-Пропантиол (изопропилмеркаптан)                     | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> S                | 0,8143                                          |
| 1-Пропантиол, 2-метил- (изобутилмеркаптан)            | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S               | 0,8339                                          |
| 2-Пропантиол, 2-метил- ( <i>tert</i> -бутилмеркаптан) | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S               | 0,8002                                          |
| 1,2,3-Пропантриол (глицерин)                          | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>   | 1,2613                                          |
| Пропен (пропилен)                                     | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,5193                                          |
| 1-Пропен, 3-азидо-                                    | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub>   | 0,924 (25° C)                                   |
| — 1-бром- ( <i>trans</i> )                            | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> Br               | 1,428                                           |
| — 2-бром-                                             | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> Br               | 1,362                                           |
| — 3-бром-                                             | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> Br               | 1,398                                           |
| — гексафтор-                                          | C <sub>3</sub> F <sub>6</sub>                  | 1,583 (—40° C)                                  |
| — 1,2-дихлор-                                         | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>  | 1,1818                                          |
| — 3-иод-                                              | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> I                | 1,8494                                          |
| — 2-метил- (изобутилен)                               | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,5942                                          |
| — 3-метокси-                                          | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,77 (11° C)                                    |
| — 1-нитро-                                            | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N | 1,065                                           |
| — 1,2,3-трихлор-                                      | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>  | 1,414                                           |
| — 1-хлор- ( <i>trans</i> )                            | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> Cl               | 0,9350                                          |
| — 3-этокс-                                            | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,7651                                          |
| Пропеналь (акриловый альдегид)                        | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O                | 0,8410                                          |
| —, диацетат                                           | C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>  | 1,0760                                          |
| —, диэтилацеталь                                      | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>  | 0,8543 (15° C)                                  |
| — 2-метил-                                            | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,837                                           |
| Пропеновая кислота (акриловая кислота)                | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>   | 1,0511                                          |
| —, аллиловый эфир                                     | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9441                                          |
| —, бутиловый эфир                                     | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>  | 0,8898                                          |
| —, изобутиловый эфир                                  | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>  | 0,8896                                          |
| —, метиловый эфир                                     | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9535                                          |
| —, нитрил                                             | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N                | 0,8060                                          |
| —, хлорангидрид                                       | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> OCl              | 1,1136                                          |
| —, этиловый эфир                                      | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9234                                          |
| — 2-метил- (метакриловая кислота)                     | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>   | 1,0153                                          |
| 2-Пропен-1-ол (аллиловый спирт)                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,8540                                          |
| — 2-метил (металлиловый спирт)                        | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,8515                                          |
| 2-Пропен-1-тиол (аллилмеркаптан)                      | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> S                | 0,925 (23° C)                                   |
| Пропиламин                                            | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N                | 1,1064                                          |
| — <i>N</i> , <i>N</i> -диметил-                       | C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N               | 0,7173                                          |
| — <i>N</i> -метил-                                    | C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N               | 0,7574                                          |
| — 3-метокс-                                           | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> ON               | 0,7204 (17° C)                                  |
| — 1,2,2-триметил                                      | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> ON              | 0,7668                                          |
| — 1-этил-                                             | C <sub>3</sub> H <sub>13</sub> N               | 0,7487                                          |
| Пропилгидразин                                        | C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>  | 0,8406                                          |
| Пропилендиамин                                        | C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>  | 0,8584 (25° C)                                  |
| Пропилизотиоцианат                                    | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NS               | 0,9781 (16° C)                                  |
| Пропилизотионид                                       | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> N                | 0,7599 (17° C)                                  |
| Пропилнитрат                                          | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O <sub>3</sub> N | 1,0538                                          |
| Пропилнитрит                                          | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> N | 0,935                                           |
| Пропин                                                | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>                  | 0,7062 (—50° C)                                 |
| — 3-бром-                                             | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> Br               | 1,579                                           |
| — 3-иод-                                              | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> I                | 2,0177 (0° C)                                   |

| Название                                        | Формула                                         | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| — 3-метокси-                                    | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                 | 0,83 (12° C)                                    |
| — 3-хлор-                                       | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> Cl                | 1,0297                                          |
| — 1-этокс-                                      | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O                 | 0,8276                                          |
| Пропиналь (пропиоловый альдегид)                | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O                 | 0,9152                                          |
| Пропиновая кислота (пропаргиловая кислота)      | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>    | 1,1380                                          |
| 2-Пропин-1-ол (пропаргиловый спирт)             | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O                 | 0,9485                                          |
| Силанол, триметил-                              | C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> OSi              | 0,8112                                          |
| Тетраэтилгерманий                               | C <sub>4</sub> H <sub>20</sub> Ge               | 0,9932                                          |
| Тетраэтилсвинец                                 | C <sub>4</sub> H <sub>20</sub> Pb               | 1,6524                                          |
| 1,4-Тиазин, тетрагидро-                         | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> NS                | 1,0882                                          |
| Тиазол                                          | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> NS                | 1,1998 (17° C)                                  |
| Тиетан                                          | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> S                 | 1,0020                                          |
| Тиран (этиленсульфид)                           | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> S                 | 1,0130                                          |
| — 2,2-диметил-                                  | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> S                 | 0,9013                                          |
| — метил-                                        | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> S                 | 0,944                                           |
| — фенил-                                        | C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> S                 | 1,1044 (25° C)                                  |
| — этил-                                         | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> S                 | 0,927                                           |
| Тиопиран-2-он, тетрагидро-                      | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> OS                | 1,155                                           |
| Тиоуксусная кислота                             | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OS                | 1,064                                           |
| Тиофен                                          | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> S                 | 1,0648                                          |
| — 2-ацетил-                                     | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OS                | 1,1679                                          |
| — 2-бром-                                       | C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> BrS               | 1,684                                           |
| — 2-гидрокси-                                   | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> OS                | 1,255                                           |
| — 2,5-дибром-                                   | C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> S | 2,147 (23° C)                                   |
| — 2,3-диметил-                                  | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S                 | 1,0021                                          |
| — 2-иод-                                        | C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> IS                | 2,0595 (25° C)                                  |
| — 2-метил-                                      | C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> S                 | 1,0193                                          |
| — тетрагидро-                                   | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> S                 | 0,9987                                          |
| — тетрахлор-                                    | C <sub>4</sub> Cl <sub>4</sub> S                | 1,7036 (30° C)                                  |
| — 2-хлор-                                       | C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> ClS               | 1,2863                                          |
| — 2-этил-                                       | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> S                 | 0,9928                                          |
| Тиофен-1,1-диоксид, тетрагидро-                 | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> S  | 1,2615 (30° C)                                  |
| 2-Тиофенкарбальдегид                            | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> OS                | 1,224                                           |
| Тиофенол                                        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> S                 | 1,0766                                          |
| — 2-метил-                                      | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> S                 | 1,041                                           |
| — 4-метокс-                                     | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> OS                | 1,1313 (25° C)                                  |
| — 2-хлор-                                       | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ClS               | 1,2752                                          |
| 1,2,3-Триазол                                   | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N <sub>3</sub>    | 1,1861 (25° C)                                  |
| Триметиалюминий                                 | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> Al                | 0,752                                           |
| Триметиламин                                    | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N                 | 0,6356                                          |
| Триметиларсин                                   | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> As                | 1,144 (15° C)                                   |
| Триметилборат                                   | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> O <sub>3</sub> B  | 0,915                                           |
| Триметилсиднамин                                | C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>   | 0,884 (25° C)                                   |
| Триметилстибин                                  | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> Sb                | 1,523 (15° C)                                   |
| Триметилфосфат                                  | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> O <sub>4</sub> P  | 1,2144                                          |
| Триметилфосфит                                  | C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> O <sub>3</sub> P  | 1,052                                           |
| Триэтилалюминий                                 | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> Al               | 0,825                                           |
| Триэтиламин                                     | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> N                | 0,7257                                          |
| Триэтиларсин                                    | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> As               | 1,150                                           |
| Триэтилборат                                    | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> O <sub>3</sub> B | 0,8546 (28° C)                                  |
| Триэтилстибин                                   | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> Sb               | 1,3224 (16° C)                                  |
| Триэтилфосфат                                   | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> O <sub>4</sub> P | 1,0695                                          |
| Триэтилфосфин                                   | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> P                | 0,8006                                          |
| Триэтилфосфит                                   | C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> O <sub>3</sub> P | 0,9629                                          |
| Угольная кислота, бензиловый эфир, хлорангидрид | C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> Cl | 1,20                                            |
| —, бутиловый эфир, хлорангидрид                 | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> Cl | 1,0513                                          |

| Название                            | Формула                                                      | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| —, диметилловый эфир                | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>                 | 1,0706                                          |
| —, дипропиловый эфир                | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>                | 0,9435                                          |
| —, дихлорангидрид (фосген)          | COCl <sub>2</sub>                                            | 1,381                                           |
| —, диэтиловый эфир                  | C <sub>3</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>                | 0,9764                                          |
| —, изобутиловый эфир, хлорангидрид  | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,0426                                          |
| —, изопентиловый эфир, хлорангидрид | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> OCl                           | 1,049                                           |
| —, изопропиловый эфир, хлорангидрид | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> O <sub>3</sub> Cl              | 1,0777                                          |
| —, метиловый эфир, хлорангидрид     | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,2298                                          |
| —, пропиловый эфир, хлорангидрид    | C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,0902                                          |
| Уксусная кислота                    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>                 | 1,0492                                          |
| —, аллиловый эфир                   | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9277                                          |
| —, амид,                            | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> ON                             | 0,9986 (25° C)                                  |
| —, ангидрид                         | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>                 | 1,0820                                          |
| —, бромангидрид                     | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OBr                            | 1,6625 (16° C)                                  |
| —, бутиловый эфир                   | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8825                                          |
| —, виниловый эфир                   | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9342                                          |
| —, изобутиловый эфир                | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8710                                          |
| —, изопропениловый эфир             | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9090                                          |
| —, изопропиловый эфир               | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8718                                          |
| —, иодангидрид                      | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OI                             | 2,0674                                          |
| —, метиловый эфир                   | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,933                                           |
| —, нитрил                           | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N                              | 0,7843                                          |
| —, пентиловый эфир                  | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8745                                          |
| —, пропиловый эфир                  | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                | 0,8867                                          |
| —, фторангидрид                     | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OF                             | 1,002 (15° C)                                   |
| —, хлорангидрид                     | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OCl                            | 1,1051                                          |
| —, хлорметиловый эфир               | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,194                                           |
| —, этиловый эфир (этилацетат)       | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,9003                                          |
| —, амино- (глицин)                  | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N               | 1,1607                                          |
| —, бром-                            | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> Br              | 1,9335 (50° C)                                  |
| —, дибром-                          | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> | 1,0921                                          |
| —, дифтор-                          | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> F <sub>2</sub>  | 1,5255                                          |
| —, дихлор-                          | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,5634                                          |
| —, меркапто-                        | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> S               | 1,3253                                          |
| —, метоксн-                         | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>                 | 1,1768                                          |
| —, трифтор-                         | C <sub>2</sub> HO <sub>2</sub> F <sub>3</sub>                | 1,5331 (0° C)                                   |
| —, трихлор-                         | C <sub>2</sub> HO <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub>               | 1,62                                            |
| —, фтор-                            | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> F               | 1,3693 (36° C)                                  |
| —, хлор-                            | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> Cl              | 1,4034 (40° C)                                  |
| —, этокси-                          | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>                 | 1,1021                                          |
| Фенилгидразин                       | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>                 | 1,0986                                          |
| Фенилизотиоцианат                   | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> NS                             | 1,1303                                          |
| Фенилизоцианат (карбанил)           | C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> NO                             | 1,0946                                          |
| Фенол (карболовая кислота)          | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O                              | 1,0576                                          |
| —, 4-меркапто-                      | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OS                             | 1,1285 (25° C)                                  |
| —, 2-метил-                         | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O                              | 1,0273                                          |
| —, 2-нитро-                         | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>                | 1,2942 (40° C)                                  |
| —, 2-хлор-                          | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ClO                            | 1,2634                                          |
| Формальдегид (муравьиный альдегид)  | CH <sub>2</sub> O                                            | 0,815 (—20° C)                                  |
| Фуран                               | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O                              | 0,9378                                          |
| —, 2-ацетил-                        | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                 | 1,098 (20° C)                                   |
| —, 2-бром-                          | C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> OBr                            | 1,650                                           |
| —, 2-бромметил-                     | C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> OBr                            | 1,560                                           |

| Название                          | Формула                                        | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| —, 2,5-дибром                     | C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> OBr <sub>2</sub> | 2,27                                            |
| —, 2,5-диметил                    | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,90                                            |
| —, 2,5-дихлор                     | C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> OCl <sub>2</sub> | 1,371 (25° C)                                   |
| —, 2-иод-                         | C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> IO               | 2,024                                           |
| —, 2-метил-                       | C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,9132                                          |
| —, 2-метоксн-                     | C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>   | 1,0646 (25° C)                                  |
| —, тетрагидро-                    | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,8886                                          |
| —, 2-хлор-                        | C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> OCl              | 1,1923                                          |
| —, 2-этил-                        | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,9013                                          |
| —, 2-этоксн-                      | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9849 (23° C)                                  |
| 2-Фуранкарбальдегид               | C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>   | 1,1594                                          |
| Фурфуриламмин                     | C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> ON               | 1,0533                                          |
| Циклобутан                        | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,720 (5° C)                                    |
| —, метил-                         | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,688                                           |
| —, этил-                          | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,728                                           |
| Циклобутанкарбонвая кислота       | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>   | 1,057                                           |
| Циклобутанол                      | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,9226 (15° C)                                  |
| Циклобутанон                      | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,9548 (0° C)                                   |
| Циклобутен                        | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,733 (0° C)                                    |
| 1,3-Циклогексадиен                | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,8406                                          |
| Циклогексан                       | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,7786                                          |
| —, бром-                          | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> Br              | 1,3360                                          |
| —, 1,2-дибром-(транс)             | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> Br <sub>2</sub> | 1,7759                                          |
| —, 1,2-дихлор-(транс)             | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> Cl <sub>2</sub> | 1,2021                                          |
| —, иод                            | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> I               | 0,7694                                          |
| —, метил-                         | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>                 | 0,8074                                          |
| —, метилен-                       | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,8752                                          |
| —, метокси-                       | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O               | 1,0610                                          |
| —, нитро-                         | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub> | 0,7794                                          |
| —, фтор-                          | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> F               | 0,9279                                          |
| —, хлор-                          | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> Cl              | 0,9891                                          |
| —, этил-                          | C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>                 | 0,7880                                          |
| 1,2-Циклогександион               | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>   | 1,1187                                          |
| Циклогексанкарбальдегид           | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,9235 (25° C)                                  |
| Циклогексанкарбонвая кислота      | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>  | 1,0274 (30° C)                                  |
| Циклогексанол                     | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,9624                                          |
| —, 1-метил-                       | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O               | 0,9194                                          |
| —, 2-хлор-(транс)                 | C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> OCl             | 1,1461 (16° C)                                  |
| Циклогексанон                     | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,9455                                          |
| Циклогексантиол                   | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> S               | 0,9786                                          |
| Циклогексен                       | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,8102                                          |
| 1-Циклогексенкарбальдегид         | C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,9694                                          |
| 1-Циклогексен-1-карбонвая кислота | C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>  | 1,109                                           |
| 2-Циклогексен-1-ол                | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O               | 0,9923 (15° C)                                  |
| 2-Циклогексен-1-он                | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,9931                                          |
| Циклогексиламин                   | C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> N               | 0,8671                                          |
| Циклогексизоцианат                | C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> ON              | 0,9852                                          |
| Циклопентан                       | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,8098                                          |
| 1,2-Циклогептандион               | C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>  | 1,0607 (22° C)                                  |
| Циклогептанол                     | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O               | 0,9478                                          |
| Циклогептанон                     | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,9491                                          |
| 1,3,5-Циклогептатриен             | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>                  | 0,8875                                          |
| 2,4,6-Циклогептатриенон           | C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O                | 1,095 (22° C)                                   |
| Циклогептен                       | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>                 | 0,8255                                          |
| Циклопентадиен                    | C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>                  | 0,8021                                          |
| —, гексахлор                      | C <sub>6</sub> Cl <sub>6</sub>                 | 1,7119                                          |
| Циклопентан                       | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                 | 0,7454                                          |
| —, ацетил-                        | C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O               | 0,9172                                          |

| Название                          | Формула                                                     | Плотность<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| — бром-                           | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> Br                            | 1,3873                                         |
| — метил-                          | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                              | 0,7486                                         |
| — хлор-                           | C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> Cl                            | 1,0053                                         |
| — этил-                           | C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>                              | 0,7665                                         |
| Циклопентанкарбальдегид           | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O                            | 0,9371                                         |
| Циклопентакарбоновая кислота      | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>               | 1,0527                                         |
| Циклопентанол                     | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O                            | 0,9478                                         |
| Циклопентанон                     | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O                             | 0,9450                                         |
| Циклопентен                       | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                               | 0,7720                                         |
| Циклопропан                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>                               | 0,6769 (—30° C)                                |
| — ацетил-                         | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O                             | 0,8984                                         |
| — винил-                          | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>                               | 0,7160                                         |
| — 1,1-диметил-                    | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>                              | 0,6589                                         |
| — метил-                          | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>                               | 0,6912 (—20° C)                                |
| Циклопропанкарбоновая кислота     | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>                | 1,0889                                         |
| —, метиловый эфир                 | C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                | 0,9972                                         |
| —, нитрил                         | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N                             | 0,8946                                         |
| —, хлорангидрид                   | C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> OCl                           | 1,1518                                         |
| —, этиловый эфир                  | C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>               | 0,9638                                         |
| Щавелевая кислота                 | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                | 1,653                                          |
| Этан                              | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                               | 0,509 (—60° C)                                 |
| — азидо-                          | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub>                | 0,8765 (25° C)                                 |
| — бром-                           | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br                            | 1,4604                                         |
| — 1-бром-2-фтор                   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> BrF                           | 1,7044 (25° C)                                 |
| — 1-бром-2-хлор                   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> BrCl                          | 1,7392                                         |
| — гексабром-                      | C <sub>2</sub> Br <sub>6</sub>                              | 2,823                                          |
| — гексафтор-                      | C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>                               | 1,590 (—78° C)                                 |
| — гексахлор-                      | C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub>                              | 2,091                                          |
| — 1,1-дибром-(этилиден-бромид)    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>               | 2,0555                                         |
| — 1,2-дибром (бромистый этилен)   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>               | 2,1792                                         |
| — 1,1-диiod-(этилиден-иодид)      | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> I <sub>2</sub>                | 2,84 (0° C)                                    |
| — 1,2-диiod-                      | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> I <sub>2</sub>                | 3,325                                          |
| — 1,2-диметокси-                  | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>               | 0,86285                                        |
| — 1,1-динитро-                    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> N <sub>2</sub> | 1,3503 (24° C)                                 |
| — 1,1-дифтор-(этилиден-фторид)    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub>                | 0,95                                           |
| — 1,2-дифтор-                     | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub>                | 1,024 (10° C)                                  |
| — 1,1-дихлор-(этилиден-хлорид)    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>               | 1,1757                                         |
| — 1,2-дихлор-(хлористый этилен)   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>               | 1,2351                                         |
| — иод-                            | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> I                             | 1,9358                                         |
| — метокси-                        | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O                             | 0,7252 (0° C)                                  |
| — нитро-                          | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>               | 1,0448 (25° C)                                 |
| — пентабром-                      | C <sub>2</sub> HBr <sub>5</sub>                             | 3,312                                          |
| — пентахлор-                      | C <sub>2</sub> HCl <sub>5</sub>                             | 1,6796                                         |
| — 1,1,1,2-тетрабром-              | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Br <sub>4</sub>               | 2,8748                                         |
| — 1,1,1,2-тетрахлор-              | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>               | 1,54064                                        |
| — 1,1,2-трибром-                  | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Br <sub>3</sub>               | 2,6211                                         |
| — 1,1,1-трифтор-                  | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub>                | 3,78·10 <sup>-3</sup>                          |
| — 1,1,1-трифтор-                  | C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>               | 1,5790                                         |
| — 2,2,2-трихлор-                  | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>               | 1,3390                                         |
| — 1,1,1-трихлор-(метил-хлороформ) | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>               | 1,3390                                         |
| — фтор-                           | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> F                             | 0,7182                                         |
| — 1-фтор-2-хлор-                  | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> FCI                           | 1,1747                                         |
| — хлор-                           | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl                            | 0,8978                                         |
| Этандиаль (глиоксаль)             | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                | 1,14                                           |

| Название                         | Формула                                        | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1,2-Этандиол (этилен-гликоль)    | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>   | 1,1088                                          |
| Этаиол (этиловый спирт)          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,7983                                          |
| — 2-азидо-                       | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON <sub>3</sub>  | 1,1454 (25° C)                                  |
| — 2-амино- (этанолламин)         | C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON               | 1,0159                                          |
| — 2-бром                         | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OBg              | 1,7629                                          |
| — 2,2-дихлор-                    | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OC1 <sub>2</sub> | 1,4040 (25° C)                                  |
| — 2-иод-                         | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OI               | 2,1968                                          |
| — 2-меркапто-                    | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> OS               | 1,1143                                          |
| — 2-метокси-                     | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9647                                          |
| — 2-нитро-                       | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>3</sub> N | 1,270 (15° C)                                   |
| — 2,2-оксиди- (диэтилен-гликоль) | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>  | 1,1160                                          |
| — 2,2,2-трифтор-                 | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OF <sub>3</sub>  | 1,3816 (25° C)                                  |
| — 2-фтор-                        | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OF               | 1,1040                                          |
| — 2-хлор-                        | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC1              | 1,2003                                          |
| — 2-этокси-                      | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub>   | 0,9301                                          |
| Этансульфоиевая кислота          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub> S | 1,3341 (25° C)                                  |
| Этантнол (этилмеркаптан)         | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S                | 0,8391                                          |
| Этиламин                         | C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N                | 1,0259                                          |
| Этилгидразин                     | C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>   | 0,9079                                          |
| N-Этилгидроксиламин              | C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON               | 0,8827 (0° C)                                   |
| O-Этилгидроксиламин              | C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON               | 0,9332                                          |
| Этилгидропероксид                | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>   | 1,013 (—6° C)                                   |
| Этилгипохлорит                   | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC1              | 0,384 (—10° C)                                  |
| Этилен                           | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>                  | 1,26·10 <sup>-3</sup> (0° C)                    |
| — бром-                          | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Br               | 1,4933                                          |
| — 1,1-дихлор-                    | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>  | 1,2129                                          |
| — иод-                           | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> I                | 2,037                                           |
| — метокси-                       | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O                | 0,7725 (0° C)                                   |
| — тетраиод-                      | C <sub>2</sub> I <sub>4</sub>                  | 2,983                                           |
| — тетрафтор-                     | C <sub>2</sub> F <sub>4</sub>                  | 1,519 (—76,3° C)                                |
| — тетрахлор-                     | C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>                 | 1,6227                                          |
| — трибром-                       | C <sub>2</sub> HBr <sub>3</sub>                | 2,708                                           |
| — трихлор-                       | C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>                | 1,4642                                          |
| — фтор-                          | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F                | 0,853 (—26° C)                                  |
| — хлор-                          | C <sub>2</sub> C <sub>3</sub> Cl               | 0,9106                                          |
| — этокси-                        | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O                | 0,7589                                          |
| Этилендиамин                     | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N                | 0,9006                                          |
| Этилизоциоцианат                 | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NS               | 0,9962                                          |
| Этилизоцианат                    | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> ON               | 0,9031                                          |
| Этилизоцианид                    | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N                | 0,7402                                          |
| Этиленитрат                      | C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>3</sub> N | 1,1076                                          |
| Этиленитрит                      | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> N | 0,9017 (14° C)                                  |
| Этии (ацетилен)                  | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>                  | 0,6181 (—22° C)                                 |
| — бром-                          | C <sub>2</sub> HBr                             | 4,7·10 <sup>-3</sup>                            |
| — метокси-                       | C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O                | 0,8001                                          |
| — хлор-                          | C <sub>2</sub> HCl                             | 2,0·10 <sup>-3</sup>                            |
| — этокси-                        | C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O                | 0,800                                           |

### 5.5. СПЛАВЫ, МИНЕРАЛЫ, ДЕРЕВО И ДРУГИЕ ТВЕРДЫЕ ВЕЩЕСТВА

| Название           | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------|----------------------------------------------|
| Дерево (сухое)     | 0,95                                         |
| атласное           | 0,11—0,14                                    |
| бальза (пробковое) |                                              |

| Название           | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ | Название          | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|--------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| бамбук             | 0,31—0,40                        | кальцит           | 2,6—2,8                          |
| бук                | 0,70—0,90                        | кварц:            |                                  |
| береза             | 0,51—0,77                        | плавленый         | 2,65                             |
| вишня              | 0,70—0,90                        | прозрачный        | 2,21                             |
| гикори             | 0,60—0,93                        | непрозрачный      | 2,07                             |
| груша              | 0,61—0,73                        | кокс              | 1,0—1,7                          |
| дуб                | 0,60—0,90                        | конол             | 1,04—1,14                        |
| ель канадская      | 0,48—0,70                        | коруид            | 3,9—4,0                          |
| железное (бакаут)  | 1,17—1,33                        | кремень           | 2,63                             |
| ива                | 0,40—0,60                        | магнетит          | 4,9—5,2                          |
| камедное           | 1,00                             | малахит           | 3,7—4,1                          |
| кедр               | 0,49—0,57                        | мел               | 1,8—2,6                          |
| кизил              | 0,76                             | мергель           | 2,3—2,5                          |
| клен               | 0,62—0,75                        | мрамор            | 2,6—2,84                         |
| красное (Гондурас) | 0,66                             | наждак            | 4,0                              |
| красное (Испания)  | 0,85                             | опал              | 2,2                              |
| липа               | 0,32—0,59                        | пемза             | 0,4—0,9                          |
| лиственница        | 0,67                             | песчаник          | 1,9—2,65                         |
| можжевельник       | 0,56                             | пирит             | 4,95—5,1                         |
| ольха              | 0,42—0,68                        | полевои шпат      | 2,55—2,75                        |
| орех               | 0,64—0,70                        | порфир            | 2,6—2,9                          |
| осина              | 0,50                             | роговая обманка   | 2,9—3,2                          |
| остролист          | 0,76                             | серпантин         | 2,5—2,65                         |
| пихта              | 0,40                             | сланец            | 2,6—3,3                          |
| платан             | 0,40—0,60                        | слюда:            |                                  |
| рожковое           | 0,67—0,71                        | белая             | 2,76—3,00                        |
| самшит             | 0,95—1,16                        | обычная           | 2,6—3,2                          |
| сандаговое         | 0,91                             | черная            | 2,7—3,1                          |
| слива              | 0,66—0,78                        | соль каменная     | 2,18                             |
| сосна:             |                                  | тальк             | 2,7—2,8                          |
| белая              | 0,50—0,55                        | топаз             | 3,5—3,6                          |
| обыкновенная       | 0,37—0,60                        | торф, сухой       | 0,5                              |
| тик:               |                                  | торианит (R)      | 9,32—9,33                        |
| индийский          | 0,66—0,88                        | торит (R)         | 4,5—5,4                          |
| африканский        | 0,98                             | трогерит (R)      | 3,3                              |
| тополь             | 0,35—0,5                         | турмалин          | 3,0—3,2                          |
| эбеновое (черное)  | 1,11—1,33                        | туф лавовый       | 0,75—1,4                         |
| эльм               | 0,54—0,60                        | уголь:            |                                  |
| яблоня             | 0,66—0,84                        | антрацит          | 1,4—1,8                          |
| ясень              | 0,65—0,85                        | битуминозный      | 1,2—1,5                          |
| <b>Минералы</b>    |                                  | уранит (R)        | 6,5—9,7                          |
| агат               | 2,5—2,8                          | уранит:           |                                  |
| алебастр:          |                                  | кальцевый (R)     | 3,05—3,19                        |
| карбонатный        | 2,69—2,78                        | медный (R)        | 3,22—3,60                        |
| сульфатный         | 2,26—2,32                        | флюорит           | 3,18                             |
| алмаз              | 3,01—3,52                        | <b>Сплавы</b>     |                                  |
| альбит             | 2,62—2,65                        | алюмель           | 8,48                             |
| андезит            | 2,2—2,7                          | бронза            | 7,5—9,1                          |
| анортит            | 2,74—2,76                        | вуда              | 9,7                              |
| асбест             | 2,1—2,8                          | дюралюминий       | 2,6—2,9                          |
| асбестовый сланец  | 1,8                              | иввар             | 7,9                              |
| базальт            | 2,6—3,25                         | константан        | 8,88                             |
| берилл             | 2,69—2,70                        | копель            | 8,9                              |
| бештаунит          | 2,4—2,5                          | куниаль           | 8,5—8,7                          |
| газовый уголь      | 1,88                             | латуни            | 8,2—8,85                         |
| галенит            | 7,3—7,6                          | магналиум         | 2,50                             |
| гематит            | 4,9—5,3                          | манганин          | 8,4                              |
| гипс               | 2,31—2,33                        | мельхиор          | 8,9                              |
| глина              | 1,6—2,9                          | монель-металл     | 8,8                              |
| гранат             | 3,15—4,3                         | нейзильбер        | 8,7—8,82                         |
| гранит             | 2,34—2,76                        | никелин           | 8,8                              |
| доломит            | 2,84                             | нихром            | 8,4                              |
| известняк          | 2,68—2,76                        | платино-иридиевый | 21,62                            |
| известь гашеная    | 1,15—1,25                        |                   |                                  |



| Название                       | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------|----------------------------------------------|
| Сталь:                         |                                              |
| нелегированная, низко- и сред- | 7,77—7,85                                    |
| нелегированная                 |                                              |
| нержавеющая, жаропрочная,      | 7,9—8,2                                      |
| жаростойкая                    |                                              |
| ферронихром                    | 8,4                                          |
| хромель                        | 8,7                                          |
| чугун:                         |                                              |
| белый                          | 7,6—7,8                                      |
| серый                          | 7,0—7,2                                      |
| электрон                       | 1,8                                          |
| <b>Другие вещества</b>         |                                              |
| асфальт                        | 1,1—2,8                                      |
| бетон                          | 1,8—2,5                                      |
| битум                          | ~1                                           |
| бумага                         | 0,7—1,15                                     |
| вазелин                        | 0,8—0,9                                      |
| воск пчелиный                  | 0,96                                         |
| гуммиарабик                    | 1,3—1,4                                      |
| гуммигут                       | 1,2                                          |
| деготь, смола                  | 1,02                                         |
| желатин                        | 1,27                                         |
| каменное литье                 | 2,9—2,95                                     |
| камень мыльный                 | 2,6—2,8                                      |
| камфара                        | 0,99                                         |
| каифоль                        | 1,07                                         |
| картон                         | 0,69                                         |
| каучук растительный            | 0,91                                         |
| керамика                       | 2,1—2,3                                      |
| киноварь                       | 8,12                                         |
| кирпич:                        |                                              |
| обыкновенный                   | 1,4—1,6                                      |
| огнеупорный                    | 1,7—2,0                                      |
| кожа сухая                     | 0,86                                         |
| кость                          | 1,7—2,0                                      |
| кость слоювая                  | 1,83—1,92                                    |
| крахмал                        | 1,5                                          |
| лед (0° С)                     | 0,917                                        |
| линолеум                       | 1,18                                         |
| охра                           | 3,5                                          |
| парафин                        | 0,87—0,91                                    |
| песок:                         |                                              |
| сухой                          | 1,2—1,6                                      |
| сырой                          | 1,9—2,1                                      |
| пирекс                         | 2,25                                         |
| почва                          | 1,3—2,0                                      |
| пробка                         | 0,22—0,26                                    |
| резина:                        |                                              |
| мягкая                         | 1,1                                          |
| твердая                        | 1,19                                         |
| чистая                         | 0,91—0,93                                    |
| сажа                           | 1,8—1,9                                      |
| сахар                          | 1,59                                         |
| ситалл                         | 2,5                                          |
| смола естественная             | 1,0—1,1                                      |
| снег (рыхлый)                  | 0,12                                         |
| соль поваренная                | 2,2                                          |
| стеарин                        | 1,0                                          |
| стекло:                        |                                              |
| боросиликатное термостойкое    | 2,2—2,4                                      |
| кварцевое                      | 2,2                                          |
| обыкновенное                   | 2,4—2,8                                      |
| флинт-глас                     | 3,9—5,9                                      |
| сургуч                         | 1,8                                          |
| сурик свинцовый                | 8,9—9,1                                      |

| Название            | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------|----------------------------------------------|
| уголь древесный:    |                                              |
| дубовый             | 0,57                                         |
| сосновый            | 0,28—0,44                                    |
| фарфор              | 2,3—2,5                                      |
| фаянс               | 1,9—1,96                                     |
| фибра красная       | 1,45                                         |
| целлулоид           | 1,4                                          |
| цемент затвердевший | 2,6—3,2                                      |
| шамот               | 1,85—2,2                                     |
| шифер               | 2,7—2,8                                      |
| шлак доменный       | 2,6—3,0                                      |
| шлакоситалл:        |                                              |
| белый               | 1,6—2,77                                     |
| серый               | 2,6—2,75                                     |
| эбонит              | 1,15                                         |
| янтарь              | 1,1                                          |

## 5.6. ПЛАСТМАССЫ [8]

| Название                             | Плотность, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| Акрилнирибутадиенистирольный пластик | 1,03—1,05                                    |
| Акриловый илльная масса              | 1,13                                         |
| Аминопласт                           | 1,4—2,0                                      |
| Ангелит                              | 1,7—1,95                                     |
| Анид                                 | 1,14—1,16                                    |
| Анид стеклонаполненный               | 1,4                                          |
| Антифрикционный пластик              | 1,74—1,80                                    |
| Асботекстолит электротехнический     | 1,5—1,7                                      |
| листовой                             |                                              |
| Винипласт:                           |                                              |
| листовой                             | 1,38—1,43                                    |
| ударопрочный                         | 1,40—1,45                                    |
| Волокнит                             |                                              |
| Гетинакс электротехнический листовый | 1,28—1,45                                    |
| Дакрил                               | 1,19                                         |
| Дифсан                               | 1,32                                         |
| Древеснослоистый пластик типа ДСП    | 1,25—1,30                                    |
| Изодии                               | 1,35—1,45                                    |
| Капролит                             | 1,2                                          |
| Капролон                             | 1,15—1,16                                    |
| Капрои                               | 1,1—1,2                                      |
| Ниплои                               | 1,3—1,34                                     |
| Пенопласт К-40                       | 0,2—0,4                                      |
| Пентопласт                           | 1,32—1,40                                    |
| Полиакрилат                          | 1,2                                          |
| Полиамид                             | 1,02—1,13                                    |
| Полиамид стеклонаполненный           | 1,35—1,38                                    |
| Поливинилхлорид:                     |                                              |
| суспензионный                        | 1,34—1,43                                    |
| эмульсионный                         | 0,5—0,63                                     |
| Поливинилхлоридный пенопласт         | 0,1—0,3                                      |
| Поликарбонат (дифлон)                | 1,2                                          |
| Полиметилметакрилат:                 |                                              |
| литьевой                             | 1,18—1,2                                     |
| суспензионный                        | 1,19                                         |
| Полипропилен                         | 0,9—0,92                                     |
| Полистирол:                          |                                              |
| общего назначения                    | 1,05—1,10                                    |
| ударопрочный                         | 1,06                                         |

| Название                                | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|-----------------------------------------|----------------------------------|
| Полистирольный пластик                  | 1,2                              |
| Полисульфон                             | 1,25                             |
| Полнуретан                              | 1,21                             |
| Полиэтилен:                             |                                  |
| высокого давления                       | 0,90—0,94                        |
| низкого давления                        | 0,95—0,96                        |
| Полиэтиленпирефталат (лавсан)           | 1,32—1,53                        |
| Ретинакс                                | 2,4—2,7                          |
| Смола:                                  |                                  |
| полиамидная                             | 1,11—1,12                        |
| полиэпоксидная                          | 1,1—1,2                          |
| полиэфирная                             | 1,08—1,3                         |
| эпоксидиановая                          | 1,2—1,3                          |
| эпоксидная                              | 1,13—1,2                         |
| Сополимер:                              |                                  |
| стирола                                 | 1,12—1,14                        |
| этилена с пропиленом                    | 0,90—0,96                        |
| этилена с винилацетатом                 | 0,92—0,96                        |
| Стекловолокнит                          | 1,7—1,9                          |
| Стекловолокнистый анизотропный материал | 1,8—2,0                          |
| Стекло органическое:                    |                                  |
| конструкционное                         | 1,18—1,19                        |
| техническое                             | 1,18                             |
| Стеклопластик                           | 1,65—1,78                        |
| Стеклотекстолит:                        |                                  |
| конструкционный                         | 1,77—1,9                         |
| электротехнический                      | 1,6—1,9                          |
| Текстолит:                              |                                  |
| графитированный                         | 1,3—1,4                          |
| конструкционный                         | 1,3—1,4                          |
| электротехнический листовой             | 1,25—1,45                        |
| Фенилон                                 | 1,35                             |
| Фенолит                                 | 1,5—1,6                          |
| Фенольная прессовочная масса            | 1,4—1,85                         |
| Фенопласт:                              |                                  |
| влагохмстойкий                          | 1,5—1,6                          |
| жаростойкий                             | 1,75—1,90                        |
| литьевой                                | 1,4—1,5                          |
| общего назначения                       | 1,40—1,45                        |
| ударопрочный                            | 1,45                             |
| электроизоляционный                     | 1,85                             |
| Флан                                    | 1,2—2,6                          |
| Фторопласт                              | 1,65—1,80;                       |
|                                         | 2,02—2,23                        |
| Фуранит                                 | 1,60—1,85                        |
| Этрол:                                  |                                  |
| ацетопропионатцеллюлозный               | 1,16—1,25                        |
| ацетилцеллюлозный                       | 1,27—1,34                        |
| нитроцеллюлозный                        | 1,8—2,0                          |

## 5.7. ЖИДКОСТИ [5, 17]

| Название                   | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|----------------------------|----------------------------------|
| Азотная кислота (100%-ная) | 1,50                             |
| Ацетон                     | 0,80                             |
| Бензин                     | 0,7—0,8                          |
| Бензол                     | 0,88                             |
| Глицерин                   | 1,26                             |
| Дизельное топливо          | 0,86                             |
| Камениугольная смола       | 1,05—1,25                        |

| Название                           | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Керосин                            | 0,81—0,84                        |
| Креозот                            | 1,04—1,10                        |
| Мазут                              | 0,91—0,99                        |
| Масло:                             |                                  |
| касторовое                         | 0,96                             |
| растительное                       | 0,91—0,97                        |
| трансформаторное                   | 0,84—0,89                        |
| Медный купорос:                    |                                  |
| 10%-ный                            | 1,107                            |
| 20%-ный                            | 1,230                            |
| Молоко                             | 1,03                             |
| Нефть                              | 0,73—0,94                        |
| Олифа                              | 0,93—0,95                        |
| Раствор поваренной соли в воде:    |                                  |
| 10%-ный                            | 1,071                            |
| 20%-ный                            | 1,148                            |
| Серная кислота (концентрированная) | 1,83                             |
| Скипидар                           | 0,87                             |
| Соляная кислота (20%-ная)          | 1,10                             |
| Спирт этиловый                     | 0,79                             |
| Стекло растворимое (жидк.)         | 1,35—1,53                        |
| Эфир                               | 0,72                             |

## 5.8. РТУТЬ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ [13]

| $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| 0                   | 13,59503                         | 220                 | 13,06431                         |
| 10                  | 13,57039                         | 230                 | 13,04048                         |
| 20                  | 13,54583                         | 240                 | 13,01665                         |
| 30                  | 13,52133                         | 250                 | 12,99282                         |
| 40                  | 13,49689                         | 260                 | 12,96898                         |
| 50                  | 13,47251                         | 270                 | 12,94514                         |
| 60                  | 13,44819                         | 280                 | 12,92127                         |
| 70                  | 13,42393                         | 290                 | 12,89739                         |
| 80                  | 13,39971                         | 300                 | 12,87350                         |
| 90                  | 13,37554                         | 310                 | 12,8496                          |
| 100                 | 13,35142                         | 320                 | 12,8256                          |
| 110                 | 13,32734                         | 330                 | 12,8016                          |
| 120                 | 13,30330                         | 340                 | 12,7776                          |
| 130                 | 13,27929                         | 350                 | 12,7536                          |
| 140                 | 13,25531                         | 360                 | 12,7294                          |
| 150                 | 13,23137                         | 370                 | 12,7053                          |
| 160                 | 13,20745                         | 380                 | 12,6811                          |
| 170                 | 13,18356                         | 390                 | 12,6569                          |
| 180                 | 13,15968                         | 400                 | 12,6326                          |
| 190                 | 13,13582                         | 410                 | 12,6082                          |
| 200                 | 13,11197                         | 420                 | 12,5838                          |
| 210                 | 13,08814                         | 430                 | 12,5593                          |

| $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| 440                 | 12,5348                          | 630                 | 12,051                           |
| 450                 | 12,5101                          | 640                 | 12,025                           |
| 460                 | 12,4854                          | 650                 | 11,998                           |
| 470                 | 12,4607                          | 660                 | 11,972                           |
| 480                 | 12,4358                          | 670                 | 11,945                           |
| 490                 | 12,4109                          | 680                 | 11,918                           |
| 500                 | 12,386                           | 690                 | 11,891                           |
| 510                 | 12,361                           | 700                 | 11,863                           |
| 520                 | 12,336                           | 710                 | 11,836                           |
| 530                 | 12,310                           | 720                 | 11,809                           |
| 540                 | 12,285                           | 730                 | 11,781                           |
| 550                 | 12,259                           | 740                 | 11,753                           |
| 560                 | 12,234                           | 750                 | 11,725                           |
| 570                 | 12,208                           | 760                 | 11,697                           |
| 580                 | 12,182                           | 770                 | 11,669                           |
| 590                 | 12,156                           | 780                 | 11,641                           |
| 600                 | 12,130                           | 790                 | 11,612                           |
| 610                 | 12,104                           | 800                 | 11,584                           |
| 620                 | 12,078                           |                     |                                  |

### 5.9. ДИСТИЛЛИРОВАННАЯ ВОДА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ [6]

| $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$ |
|---------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| 0                   | 0,999841                         | 13                  | 0,999377                         |
| 1                   | 0,999900                         | 14                  | 0,999244                         |
| 2                   | 0,999941                         | 15                  | 0,999099                         |
| 3                   | 0,999965                         | 16                  | 0,998943                         |
| 4                   | 0,999973                         | 17                  | 0,998775                         |
| 5                   | 0,999965                         | 18                  | 0,998596                         |
| 6                   | 0,999941                         | 19                  | 0,998406                         |
| 7                   | 0,999909                         | 20                  | 0,998205                         |
| 8                   | 0,999849                         | 21                  | 0,997994                         |
| 9                   | 0,999782                         | 22                  | 0,997772                         |
| 10                  | 0,999701                         | 23                  | 0,997540                         |
| 11                  | 0,999606                         | 24                  | 0,997299                         |
| 12                  | 0,999498                         | 25                  | 0,997047                         |

1. Moses J. The Practicing Scientist's Handbook. A Guide for Physical and Terrestrial Scientists and Engineers. N. Y.: Van Nostrand Reinhold Company. 1978.

2. Свойства элементов: Справочник. Ч. 1. Физические свойства/Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1976

3. Свойства неорганических соединений: Справочник/А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.

4. Nuclear Wallet Cards/Ed. by V. S. Shirleg, C. M. Lederer. Produced by the Isotopes Project, Lawrence Berkely Laboratory, on Behalf of the U. S. Nuclear Data Network, 1979.

5. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. — 2-е изд. Л.: Химия. 1978.

6. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. Физико-химические свойства, методики, библиография: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.

7. Свойства органических соединений: Справочник/Под ред. А. А. Потехина. Л.: Химия. 1984.

8. Каицельсон М. Ю., Балаев Г. А. Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. — 3-е изд. Л.: Химия. 1978.

9. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. — 3-е изд. М.: Металлургия. 1974.

10. Кей Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.

11. Кей Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных: Пер. с англ./Под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз. 1962.

12. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972.

13. Кухлинг, Хорст. Справочник по физике: Пер. с англ. М.: Мир. 1982.

14. Чиркин В. С. Теплофизические свойства ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат. 1968.

15. Тепловые и атомные электрические станции: Справочник/Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М.: Энергоиздат. 1982.

16. Справочник химика. Основные свойства неорганических и органических соединений/Под общ. ред. Б. П. Никольского. 3-е изд. Л.: Химия, 1971. Т. 2.

17. Краткий справочник химика/Сост. В. И. Перельман. 6-е изд. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1963.

## ГЛАВА 6

## ТРЕНИЕ

И. И. Карасик

### 6.1. ВВЕДЕНИЕ

Основные понятия, относящиеся к трению, регламентированы ГОСТ 23.002—78 [3]. Внешнее трение (трение) — явление сопротивления относительно перемещению, возникающего между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии. Трение покоя наблюда-

ется при предварительных микросмещениях до перехода к относительно движению на макроуровне, после чего (при увеличении сдвигающего усилия) наблюдается трение движения. При трении скольжения скорости тел в точке касания различны по модулю и направлению или по модулю или направлению в отличие от трения качения, когда эти скорости одинаковы и по модулю, и по направлению.

Основной характеристикой трения является сила трения — сила сопротивления при относительном перемещении одного тела на поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между телами. При этом различают наибольшую силу трения покоя в пределах предварительных микро смещений (обычно называемую просто силой трения покоя или силой сцепления) и силу трения движения, а также соответственно коэффициент сцепления и коэффициент трения  $f$  как отношение указанных сил трения к нормальной относительно поверхностей трения силе (нагрузке), прижимающей тела друг к другу.

В общем случае сила трения движения

$$F = \frac{1}{v} \frac{dA}{dt},$$

где  $v$  — скорость относительного перемещения взаимно-трущихся тел;  $dA/dt$  — мощность фрикционных потерь, связанных с механическими (деформирование, адгезионное взаимодействие), физическими (адсорбция, звуковое, электромагнитные и др.), химическими (хемосорбция, химическое модифицирование поверхностного слоя) диссипативными процессами ( $A$  — работа трения, т. е. диссипируемая энергия).

При обычных лабораторных условиях в инертных средах и малой скорости скольжения, а также при трении качения решающее значение имеют компоненты диссипации, связанные с механическим взаимодействием в зоне трения.

Сила трения представляет собой результат распределенных по времени и по малым дискретным площадкам области фактического контакта актов взаимодействия различного вида:

непосредственный контакт материалов трущихся тел в исходном состоянии;

контакт через жидкостные масляные слои (гидродинамическая и гидростатическая смазка);

контакт через адсорбированные и хемосорбированные из окружающей среды и смазочного материала вещества (в частности, через граничные слои смазочного материала, частицы пыли и др.);

контакт через вторичные (образующиеся в процессе трения) структуры в поверхностных слоях трущихся тел.

Вклад этих взаимосвязанных компонент в общую силу трения различен при разноразмерной нагрузке  $P$  и скорости скольжения  $v$ , вследствие чего коэффициент трения движения в общем случае является функцией  $P$  и  $v$ , внешних условий трения и смазки (в том числе условий теплоотвода), формы и размера трущихся тел.

При постоянных значениях указанных параметров и внешних условий после достаточно длительного приработочного периода устанавливаются специфические для данного комплекса параметров микрогеометрия поверхностей трущихся тел, состав и структура поверхностных слоев, значения силы и коэффициента трения.

В приработочном периоде, как правило, снижается относительная доля пластического и увеличивается доля упругого деформирования на микроконтактах, повышается контакт через защитные слои смазочного материала и вторичные структуры и снижается непосредственный контакт, что в целом приводит к снижению сил трения.

Экспериментальные значения  $f$ , в строгом смысле, относятся только к конкретным условиям испытаний и для других условий могут быть использованы лишь как ориентировочные. Имеющиеся в литературе данные, представляющие несомненный практический интерес, относятся к большому многообразию различных нестандартных условий испытаний.

При пользовании таблицами следует учитывать, что от условий испытаний в меньшей степени зависят срав-

нительные ряды значений  $f$  или количественные соотношения между значениями  $f$  для разных материалов.

При трении в вакууме вследствие затрудненного образования защитных адсорбционных слоев и связанного с этим увеличения адгезионного взаимодействия наблюдается, как правило, более сильное трение. В приработочном периоде стабилизация  $f$  происходит при более высоком значении, чем начальное, и завершается после изнашивания поверхностных структур, сформированных в процессе предшествовавшей трению обработки поверхностей.

Повышение  $v$  в общем случае проявляется в изменении  $f$  вследствие изменения реологических свойств материалов в зоне трения и фрикционного разогрева, а последний влияет на  $f$ , так как меняются соотношения между адсорбционными и десорбционными процессами и твердость.

Материалы и сопряжения материалов условно разделяют на антифрикционные ( $f=0,15 \div 0,12$  без смазки,  $f=0,1 \div 0,05$  при смазке), используемые в опорах скольжения, и фрикционные ( $f=0,3 \div 0,35$ , реже  $f=0,5 \div 0,6$ ), используемые в сцепных фрикционных устройствах (тормоза, муфты, передачи трением).

Чтобы оценка относилась к материалам трущихся сопряжений, в исходном контролируемом состоянии экспериментальное определение  $f$  стремятся осуществлять в условиях однородного по поверхности трения контакта (равномерное на макроуровне распределение давления), при постоянных расчетной площади поверхности трения, скорости скольжения (не приводящей к ощутимому нагреву), некоторых характерных значениях давления (например, при давлении, равном твердости или определенной доли твердости).

Пересчет к другим условиям производится на основе расчетных формул, учитывающих реальное контактное давление.

Значение коэффициента трения скольжения  $f$  определяется суммой адгезионной  $f_a$  и деформационной  $f_d$  составляющих, т. е.  $f = f_a + f_d$ .

Последние, обусловленные потерями повторного передеформирования тонких поверхностных слоев, при трении скольжения имеют существенное значение для весьма шероховатых поверхностей и полимерных материалов (табл. 6.1). Соотношение между адгезионной и деформационной составляющими для металлов таково, что при погрешности порядка 1% значением  $f_d$  можно пренебречь.

Прочность адгезионной связи определяется из выражения [4]

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r,$$

где  $p_r$  — фактическое давление, представляющее собой частное от деления нагрузки  $P$  на суммарную площадь пятен фактического дискретного фрикционного контакта, воспринимающих нагрузку (с учетом микрошероховатости, волнистости и макроотклонений поверхности от гео-

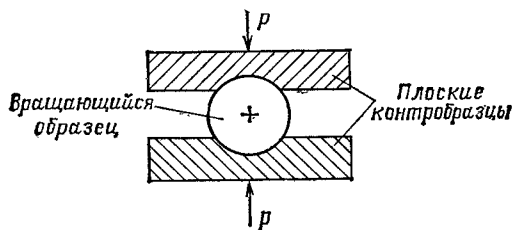


Рис. 6.1. Геометрия расположения образцов при стандартном методе определения  $\tau_0$  и  $\beta$

метрической формы);  $\tau_0$ ,  $\beta$  — параметры, характеризующие свойства материала поверхностных слоев.

На основе этой зависимости

$$f_a = \tau/p_r = \tau_0/p_r + \beta.$$

Стандартный метод [4] экспериментального определения параметров  $\tau_0$  и  $\beta$  основан (рис. 6.1) на: 1) вдавливании образца сферической формы, изготовленного из более твердого материала, в направлении нормали к поверхности плоского контробразца, изготовленного из менее твердого материала, с силой, вызывающей пластическую деформацию последнего; 2) приведении образца во вращение относительно оси, направленной по нормали к поверхности контробразца; 3) измерении моментов, развиваемых силами трения в контакте образца и контробразца, разгрузении образцов и измерении размеров отпечатков на контробразце и 4) повторении испытаний при нагрузке на два порядка меньше. При этом считается, что фактическая поверхность контакта равна сферической контуриной поверхности зоны вдавливания.

В табл. 6.2 кроме  $\tau_0$  и  $\beta$  представлены значения  $f_{ап}$  коэффициента трения при фактическом давлении, соответствующем твердости ( $p_r = \text{НВ}$  для образца из менее твердого материала испытываемого сочетания).

Фактическое давление  $p_r$  зависит от механических свойств материала в приповерхностном слое и микрогеометрии поверхности. Данными табл. 6.2 можно пользоваться для сравнения параметров режима трения материалов при одинаковых значениях фактического давления. При очень малых давлениях сравнение прочности адгезионной связи производят по значениям  $\tau_0$ , при высоких давлениях, близких к НВ, коэффициент трения оценивают по  $f_{ап}$ , при больших  $p_r$  и малых  $\tau_0$  по  $\beta$ .

Степень зависимости коэффициента трения от фактического давления оценивают по  $\tau_0$  и  $\beta$ .

Коэффициент трения качения  $f_k$ , как и трения скольжения  $f_c$ , определяется суммой адгезионной ( $f_{ка}$ ) и деформационной ( $f_{кд}$ ) составляющих,  $f_k = f_{ка} + f_{кд}$ . Адгезионная составляющая при трении качения без проскальзывания связана с повторным в процессе трения разрывом адгезионных связей в направлении их действия.

Деформационная составляющая  $f_{кд}$  при трении качения:

для сферы радиусом  $r$ , катящейся по плоскости,

$$f_{кд} = \frac{3}{16} \frac{a}{r} c;$$

для цилиндра радиусом  $r$ , катящегося по плоскости,

$$f_{кд} = \frac{2}{3\pi} \frac{a}{r} c,$$

где  $a$  — радиус площадки контакта (для сферы) и длина площадки в направлении движения (для цилиндра), рассчитанные по формуле Герца;  $c$  — коэффициент гистерезисных (деформационных) потерь, характеризующий внутреннее трение в приповерхностных слоях материала.

Для трения качения большее влияние деформационных (гистерезисных) потерь проявляется у более нагруженных тел, материалов с меньшим модулем упругости, меньшей твердостью (например, у оргстекла). При этом наблюдаются большие значения  $f_k$  по сравнению с материалами, у которых преобладает адгезионная составляющая (например, у стекла). У материалов, занимающих промежуточное положение (например, сталь, медь и др.), существен вклад обеих компонент.

## 6.2. АДГЕЗИОННАЯ СВЯЗЬ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ (табл. 6.1, 6.2)

Таблица 6.1. Соотношение между адгезионной  $F_a$  и деформационной  $f_d$  составляющими при трении скольжения

| Материал  | Фторопласт | Полиэтилен низкого давления | Полиамиды | Поликарбонаты | Резины | Металлы    |
|-----------|------------|-----------------------------|-----------|---------------|--------|------------|
| $f_a/f_d$ | 0,2—1,0    | 1—2                         | 2—9       | 4—9           | 2—3    | $\leq 100$ |

Таблица 6.2. Сдвиговая прочность адгезионной связи различных материалов при трении по стали ШХ-15 [6]

| Материал                    | НВ, 10 <sup>2</sup> Па | $f_a$ | $\tau_0$ , 10 <sup>2</sup> Па | $\beta$ |
|-----------------------------|------------------------|-------|-------------------------------|---------|
| <i>Металлы</i>              |                        |       |                               |         |
| Алюминий                    | 23                     | 0,124 | 3,00                          | 0,043   |
| Бериллий                    | —                      | —     | 0,45                          | 0,250   |
| Ванадий                     | 110,0                  | 0,103 | —                             | —       |
| Железо                      | 130,0                  | 0,097 | —                             | —       |
| (армко)                     | 65,0                   | 0,160 | —                             | —       |
| Висмут                      | 7,70                   | 0,175 | 0,454                         | 0,116   |
| Вольфрам                    | 285                    | 0,082 | —                             | —       |
| Индий                       | 0,80                   | 0,20  | 0,107                         | 0,066   |
| Кадмий                      | 23,0                   | 0,096 | 0,943                         | 0,055   |
| Кобальт                     | 130,0                  | 0,092 | —                             | —       |
| Магний                      | 44,0                   | 0,082 | 8,00                          | 0,020   |
| Молибден                    | 186,0                  | 0,095 | 2,79                          | 0,080   |
|                             | 110,0                  | 0,105 | 1,87                          | 0,088   |
| Медь                        | 85,0                   | 0,10  | 1,70                          | —       |
|                             | 52,0                   | 0,115 | 1,82                          | 0,080   |
|                             | 28,5                   | 0,139 | 1,68                          | —       |
| Никель                      | 180,0                  | 0,095 | 3,48                          | —       |
|                             | 105,0                  | 0,130 | 1,47                          | 0,116   |
|                             | 70,0                   | 0,123 | 0,49                          | —       |
| Ниобий                      | 32,0                   | 0,142 | 0,896                         | 0,114   |
| Олово                       | 4,40                   | 0,170 | 0,449                         | 0,068   |
| Платина                     | —                      | —     | 9,50                          | 0,10    |
| Рений                       | 105                    | 0,095 | —                             | —       |
| Свинец                      | 3,3                    | 0,140 | 0,274                         | 0,057   |
| Серебро                     | 55                     | 0,096 | 0,77                          | 0,081   |
|                             | —                      | 0,096 | 1,00                          | 0,080   |
| Сурьма                      | 27,0                   | 0,127 | 0,73                          | 0,100   |
| Таитал                      | 78,0                   | 0,115 | 2,42                          | 0,084   |
| Титан                       | 190                    | 0,085 | 2,90                          | 0,080   |
|                             | 128                    | 0,10  | 2,82                          | 0,078   |
| Хром                        | 200                    | 0,095 | —                             | —       |
|                             | 100                    | 0,135 | 1,50                          | 0,120   |
| Цинк                        | 33,0                   | 0,088 | —                             | —       |
| Цирконий                    | 74,0                   | 0,121 | —                             | —       |
| <i>Подшипниковые сплавы</i> |                        |       |                               |         |
| БН                          | 25                     | 0,102 | —                             | —       |
| Б83                         | 24                     | 0,150 | —                             | —       |
| АСС-6-5                     | —                      | —     | 1,0                           | 0,065   |
| А-20                        | —                      | —     | 1,6                           | 0,050   |
| Бронза бериллиевая          | 150                    | 0,095 | —                             | —       |
| А-9                         | —                      | —     | 0,75                          | 0,12    |
| ЦАМ                         | —                      | —     | 0,50                          | 0,05    |
| Бр. Б2                      | —                      | 0,095 | 2,45                          | 0,085   |
| Бр. АЖ Мц 10-3-1,5          | —                      | 0,120 | 2,00                          | 0,100   |

Таблица 6.3. Коэффициент трения покоя (сцепления) [1]

| Материал            | НВ,<br>10 <sup>2</sup> Па | $t_a$ | $\tau_0$ , 10 <sup>2</sup> Па | $\beta$ |
|---------------------|---------------------------|-------|-------------------------------|---------|
| <b>Пластмассы</b>   |                           |       |                               |         |
| Винипласт светлый   | 12,0                      | 0,091 | 0,372                         | 0,06    |
| Капролон            | 13,0                      | 0,065 | 0,15—0,195                    | 0,05    |
| Капрон технический  | 7,0                       | 0,063 | 0,161                         | 0,04    |
| Полиэтилен ПЭВД     | 2,0                       | 0,080 | 0,044                         | 0,058   |
|                     | 2,6                       | 0,090 | 0,130                         | 0,040   |
| Полиэтилен ПЭНД     | 3,8                       | 0,080 | 0,114                         | 0,050   |
| Полипропилен        | 3,70                      | 0,380 | 0,011                         | 0,035   |
| Поликапроамид       | 7,50                      | 0,088 | —                             | —       |
| Полиамид 68П        | 16,0                      | 0,085 | —                             | —       |
| Полиметилметакрилат | —                         | 0,220 | 1,0                           | 0,150   |
| Оргстекло           | 16,0                      | 0,220 | —                             | —       |
| Фторопласт          | 3,10                      | 0,028 | 0,341                         | 0,017   |
| Фенилон             | 31,0                      | 0,065 | —                             | —       |

**Древесина**

|                                              |   |   |       |       |
|----------------------------------------------|---|---|-------|-------|
| Прессованная (без пропитки)                  | — | — | 0,050 | 0,061 |
| Пропитанная маслом индустриальным 45         | — | — | 0,100 | 0,080 |
| Пропитанная моторным маслом                  | — | — | 0,025 | 0,076 |
| Пропитанная фторопластом Ф-4                 | — | — | 0,70  | 0,074 |
| Пропитанная церезином                        | — | — | 0,070 | 0,038 |
| Пропитанная церезином и стеариновой кислотой | — | — | 0,135 | 0,028 |

**Резина**

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| —   — | 0,250 | 0,010 |
|-------|-------|-------|

**Кожевенный полуфабрикат**

|                 |   |   |                       |       |
|-----------------|---|---|-----------------------|-------|
| В сырье         | — | — | 0,22·10 <sup>-4</sup> | 0,016 |
| В голье         | — | — | 0,20·10 <sup>-4</sup> | 0,014 |
| В дубленом виде | — | — | 1,7·10 <sup>-4</sup>  | 0,080 |

**Синтетический алмаз по стали**

|          |     |       |       |       |
|----------|-----|-------|-------|-------|
| 30ХГСА   | 340 | 0,125 | 20,06 | 0,066 |
| 45       | 270 | 0,119 | 20,39 | 0,044 |
| 08Х18Н9Т | 159 | 0,15  | 3,18  | 0,130 |
| 40Х      | 341 | 0,109 | 18,41 | 0,055 |
| 45       | 324 | 0,112 | 12,96 | 0,072 |

**Трение со смазкой**

|                              |   |       |      |       |
|------------------------------|---|-------|------|-------|
| Сталь 30ХГСА при смазке:     |   |       |      |       |
| ЦИАТИМ-201                   | — | 0,045 | 0,1  | 0,04  |
| АК-6                         | — | 0,095 | 0,1  | 0,10  |
| вазелиновое масло            | — | 0,100 | 1,0  | 0,12  |
| керосин                      | — | 0,123 | 1,65 | 0,11  |
| Бр.Б2 при смазке:            |   |       |      |       |
| ЦИАТИМ-201                   | — | 0,032 | 0,05 | 0,03  |
| АК-6                         | — | 0,063 | 0,10 | 0,06  |
| вазелиновое масло            | — | 0,070 | 0,10 | 0,07  |
| керосин                      | — | 0,073 | 0,70 | 0,06  |
| Бр.АЖМЦ 10-3-1,5 при смазке: |   |       |      |       |
| ЦИАТИМ-201                   | — | 0,340 | 0,05 | 0,032 |
| АК-6                         | — | 0,075 | 0,10 | 0,073 |
| вазелиновое масло            | — | 0,08  | 0,10 | 0,078 |
| керосин                      | — | 0,10  | 0,10 | 0,10  |

| Материал                                                     | $f_s$    |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Металлы по металлу:</b>                                   |          |
| тщательно очищенные от окисных пленок                        | 100      |
| несмазанные на воздухе                                       | 1,0      |
| смазанные минеральным маслом                                 | 0,2—0,4  |
| смазанные животным и растительными маслами                   | 0,1      |
| <b>Сплавы, трущиеся по стали:</b>                            |          |
| медно-свинцовый, несмазанный                                 | 0,2      |
| медно-свинцовый, смазанный минеральным маслом                | 0,1      |
| <b>Белый металл, сплав Вуда:</b>                             |          |
| несмазанный                                                  | 0,7      |
| смазанный минеральным маслом                                 | 0,1      |
| <b>Фосфористая бронза, латунь:</b>                           |          |
| несмазанная                                                  | 0,35     |
| смазанная минеральным маслом                                 | 0,15—0,2 |
| <b>Обычное железо:</b>                                       |          |
| несмазанное                                                  | 0,4      |
| смазанное минеральным маслом                                 | 0,1—0,2  |
| <b>Стальные поверхности высокой твердости при смазке:</b>    |          |
| растительное и животное масло                                | 0,08—0,1 |
| минеральное масло                                            | 0,12     |
| дисульфид молибдена                                          | 0,1      |
| олеиновая кислота                                            | 0,08     |
| спирт, беизин                                                | 0,4      |
| глицерин                                                     | 0,2      |
| несмазанные                                                  | 0,6      |
| <b>Тонкие металлические пленки на твердом основании:</b>     |          |
| пленка индия толщиной 10 <sup>-3</sup> — 10 <sup>-4</sup> см | 0,08     |
| свинцовые пленки                                             | 0,15     |
| медные пленки                                                | 0,3      |
| <b>Неметаллические материалы:</b>                            |          |
| стекло по стеклу, очищенные                                  | 1        |
| смазанные жидкими углеводородами, жирными кислотами          | 0,3—0,6  |
| смазанные твердыми углеводородами, жирными кислотами         | 0,1      |
| <b>Драгоценные камни:</b>                                    |          |
| алмаз по алмазу (очищенные и дегазированные)                 | 0,4      |
| очищенные на воздухе                                         | 0,1      |
| смазанные                                                    | 0,05—0,1 |
| <b>Сапфир по сапфиру:</b>                                    |          |
| очищенные и дегазированные                                   | 0,6      |
| на воздухе, очищенные                                        | 0,2      |
| на воздухе, смазанные                                        | 0,15—0,2 |
| <b>Графит по графиту:</b>                                    |          |
| очищенные и дегазированные                                   | 0,5—0,8  |
| на воздухе, очищенные                                        | 0,1      |
| на воздухе, смазанные                                        | 0,1      |
| графит по стали, очищенный и смазанный                       | 0,1      |
| очищенная каменная соль по каменной соли                     | 0,8      |
| <b>Нитрат соды по нитрату соды:</b>                          |          |
| очищенные                                                    | 0,5      |
| смазанные                                                    | 0,12     |

Продолжение табл. 6.3

| Материал                                                                                                                                      | $f_s$                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Лед по льду:<br>ниже $-50^\circ\text{C}$<br>между $0$ и $-20^\circ\text{C}$                                                                   | 0,5<br>0,05—0,1                                                                  |
| Карбид вольфрама по стали:<br>очищенные<br>смазанные                                                                                          | 0,4—0,6<br>0,1—0,2                                                               |
| Пластмассы:<br>перспекс, политех по перспексу,<br>политеху, очищенные<br>по стали, очищенные<br>нейлон по нейлону<br>ПТФЭ по ПТФЭ<br>по стали | 0,8<br>0,3—0,5<br>0,5<br>0,04—0,1<br>0,04—0,1                                    |
| Натуральные волокна:<br>шерстяное волокно по роговине<br>очищенное<br>( $f_2$ — против ворса, $f_1$ — по ворсу)<br>смазанное                  | $f_2=0,8\div 0,1$<br>$f_1=0,4\div 0,6$<br>$f_2=0,5\div 0,3$<br>$f_1=0,3\div 0,4$ |
| Натуральные волокна в состоянии<br>поставки:<br>хлопок по хлопку (нить)<br>по хлопку (хлопковая вата)<br>шелк по шелку                        | 0,3<br>0,6<br>0,2—0,3                                                            |
| Дерево по дереву:<br>очищенное сухое<br>очищенное влажное                                                                                     | 0,25—0,5<br>0,2                                                                  |
| Дерево по металлу:<br>очищенное сухое<br>очищенное влажное                                                                                    | 0,2—0,6<br>0,2                                                                   |
| Дерево по кирпичу, очищенное сухое                                                                                                            | 0,3—0,4                                                                          |
| Кожа по металлу:<br>очищенная сухая<br>очищенная влажная<br>очищенная смазанная                                                               | 0,6<br>0,4<br>0,2                                                                |
| Тормозной материал по чугуну:<br>очищенный<br>влажный<br>смазанный                                                                            | 0,4<br>0,2<br>0,1                                                                |

Таблица 6.4. Трение покоя сплавов по стали без смазки [11]

| Сплав                             | $f$  | Сплав                 | $f$  |
|-----------------------------------|------|-----------------------|------|
| Медно-свинцовый<br>(деидритный)   | 0,22 | Алюминиевая<br>бронза | 0,45 |
| Медно-свинцовый<br>(недеидритный) | 0,22 | Латунь                | 0,35 |
| Оловянный баббит                  | 0,8  | Константан            | 0,4  |
| Свинцовый баббит                  | 0,55 | Сталь                 | 0,8  |
| Сплав Вуда                        | 0,7  | Чугун                 | 0,4  |
| Фосфористая бронза                | 0,35 |                       |      |

Таблица 6.5. Трение покоя смазанных металлов по стали [11]

| Несущая поверхность | Сурепное<br>масло | Касторовое<br>масло | Минеральное<br>масло | Жирные<br>кислоты |
|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| Твердая сталь       | 0,14              | 0,12                | 0,16                 | 0,09              |
| Чугун               | 0,11              | 0,15                | 0,21                 | —                 |
| Ружейная сталь      | 0,15              | 0,16                | 0,21                 | —                 |
| Бронза              | 0,12              | 0,12                | 0,16                 | —                 |
| Чистый свинец       | —                 | —                   | 0,5                  | 0,22              |
| Свинцовый баббит    | —                 | —                   | 0,1                  | 0,08              |
| Чистое олово        | —                 | —                   | 0,6                  | 0,21              |
| Оловянный баббит    | —                 | —                   | 0,11                 | 0,07              |
| Спеченная бронза    | —                 | —                   | 0,13                 | —                 |
| Латунь              | —                 | 0,11                | 0,19                 | 0,13              |

Таблица 6.6. Трение покоя льда по льду [11]

|                                 |     |     |     |      |
|---------------------------------|-----|-----|-----|------|
| $t, ^\circ\text{C}$ . . . . . 0 | —12 | —71 | —82 | —110 |
| $f$ . . . . . 0,05—0,15         | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,5  |

6.4 ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ БЕЗ СМАЗЫВАНИЯ  
(табл. 6.7—6.12)

Таблица 6.7. Ориентировочные значения коэффициента трения скольжения несмазанных материалов [5]

| Материал           | $f$       |
|--------------------|-----------|
| Сталь по:          |           |
| стали              | 0,15—0,18 |
| чугуну             | 0,15—0,18 |
| бронзе             | 0,16—0,20 |
| Бронза по бронзе   | 0,2       |
| Дерево по бронзе   | 0,3       |
| Чугун по чугуну    | 0,10—0,21 |
| Железо по:         |           |
| железу             | 0,44      |
| чугуну             | 0,17—0,18 |
| Кожа по чугуну     | 0,2—0,4   |
| Резина по чугуну   | 0,5—0,8   |
| Бумага по чугуну   | 0,15—0,4  |
| Дерево по чугуну   | 0,25—0,5  |
| Ферродо по металлу | 0,3—0,55  |
| Фибра по металлу   | 0,4—0,8   |
| Железо по:         |           |
| бронзе             | 0,15      |
| дубу               | 0,48      |
| Дерево по дереву:  |           |
| вдоль волокон      | 0,48      |
| поперек волокон    | 0,34      |
| Сталь по льду      | 0,014     |
| Целлофан по:       |           |
| стали              | 0,27—0,29 |
| чугуну             | 0,30—0,37 |
| оберточной бумаге  | 0,3—0,4   |
| миллиметровке      | 0,35—0,38 |
| писчей бумаге      | 0,45      |
| целлофану          | 0,38—0,40 |
| коже               | 0,43—0,44 |
| резине             | 0,95      |

Таблица 6.8. Значения коэффициента трения при скольжении без смазывания гладкообработанных поверхностей [5]

| Материал                              | $f$  | Материал                       | $f$  |
|---------------------------------------|------|--------------------------------|------|
| Сталь конструкционная по:             |      | латуни Л62                     | 0,16 |
| стали конструкционной                 | 0,18 | дуралюмину                     | 0,21 |
| бронзе оловянистой                    | 0,16 | Сталь нитроvanная (35ХМЮА) по: |      |
| латуни Л62                            | 0,19 | стали закаленной               | 0,24 |
| чугуну серому                         | 0,19 | текстолиту                     | 0,36 |
| стали закаленной                      | 0,16 | гетинаксу                      | 0,24 |
| алюминию                              | 0,18 | фибре                          | 0,30 |
| дуралюмину                            | 0,20 | Латунь (Л159, Л62) по:         |      |
| электроу                              | 0,15 | бронзе оловянистой             | 0,16 |
| меди красной                          | 0,15 | латуни                         | 0,17 |
| текстолиту                            | 0,22 | чугуну серому                  | 0,16 |
| гетинаксу                             | 0,20 | дуралюмину                     | 0,22 |
| фибре                                 | 0,30 | меди                           | 0,30 |
| эбониту                               | 0,25 | алюминию                       | 0,17 |
| Сталь закаленная инструментальная по: |      | текстолиту                     | 0,30 |
| стали закаленной                      | 0,17 | фибре                          | 0,32 |
| бронзе оловянистой                    | 0,15 | Бронза оловянистая по:         |      |
| электроу                              | 0,14 | бронзе оловянистой             | 0,20 |
| агату                                 | 0,22 | чугуну серому                  | 0,21 |
| корунду                               | 0,16 | текстолиту                     | 0,23 |
| меди красной                          | 0,15 | фибре                          | 0,27 |
| текстолиту                            | 0,27 | эбониту                        | 0,43 |
| фибре                                 | 0,22 | Дуралюмин по:                  |      |
| Сталь хромоникелевая по:              |      | дуралюмину                     | 0,22 |
| стали конструкционной                 | 0,15 | меди красной                   | 0,30 |
| Сталь хромоникелевая по:              |      | текстолиту                     | 0,40 |
| стали хромоникелевой                  | 0,18 | фибре                          | 0,33 |
|                                       |      | Чугун серый по:                |      |
|                                       |      | чугуну серому                  | 0,22 |
|                                       |      | фибре                          | 0,31 |

Таблица 6.9. Коэффициент трения без смазки феноловых армированных пластмасс по стали [2]

| Материал       | Армирующий материал    | $f$       |
|----------------|------------------------|-----------|
| Текстолит      | Хлопчатобумажная ткань | 0,3       |
| Волокнит       | Хлопковое волокно      | 0,33      |
| Стекловолокнит | Стеклоанное волокно    | 0,34      |
| Асботекстолит  | Асбестовая ткань       | 0,34—0,38 |
| Фенолит        | Графит, капрон и др.   | 0,2       |

Таблица 6.10. Коэффициенты трения полимерных и древесных материалов при трении по стали [9]

| Материал                                       | $f$       |
|------------------------------------------------|-----------|
| Материалы на основе полимеров:                 |           |
| термопластичные                                | 0,15—0,40 |
| термореактивные                                | 0,1—0,4   |
| Углеродитные материалы                         | 0,2—0,35  |
| Металлокерамические материалы                  | 0,25—0,40 |
| Ленточные (слоистые) материалы                 | 0,1—0,15  |
| Прессованная древесина, пропитанная церезином  | 0,08—0,1  |
| Углепласты, углеграфиты:                       |           |
| без смазки                                     | 0,1—0,3   |
| со смазкой                                     | 0,01—0,1  |
| Древесина, наполненная:                        |           |
| раствором полиэтилена в масле МС-20, АПД-1     | 0,08—0,12 |
| сиитетическим связующим                        | 0,08—0,14 |
| стеаратом (Ц) в моторном масле                 | 0,06—0,12 |
| стеаратом (Ц) в кремнийорганическом соединении | 0,09—0,12 |
| солями меди и их оксидами и глицерином АПД-2   | 0,03—0,04 |

Таблица 6.11. Коэффициент трения для стали из опытов с наклонной плоскостью [5]

| Материал              | $f$       |
|-----------------------|-----------|
| По агату              | 0,1       |
| гранату               | 0,22      |
| сапфиру               | 0,25      |
| стеклу                | 0,12—0,14 |
| синтетическому рубину | 0,16      |
| рубину                | 0,29      |

Таблица 6.12. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения [9]

| Материал                        | $v, \text{ м/с}$ |       |      |       |       |      |
|---------------------------------|------------------|-------|------|-------|-------|------|
|                                 | 50               | 100   | 200  | 300   | 400   | 500  |
| Сталь (магниторельсовый тормоз) | 0,04             | —     | —    | —     | —     | —    |
| Висмут                          | 0,12             | 0,07  | 0,04 | —     | —     | —    |
| Сурьма                          | 0,25             | 0,18  | 0,14 | 0,1   | 0,07  | —    |
| Сталь                           | 0,12             | 0,10  | 0,08 | 0,06  | 0,05  | 0,04 |
| Медь                            | 0,23             | 0,17  | 0,12 | 0,09  | 0,08  | 0,07 |
| Карбид титана                   | 0,22             | 0,16  | 0,11 | 0,08  | 0,06  | 0,05 |
| Оксид алюминия                  | 0,17             | 0,15  | 0,13 | 0,12  | 0,11  | 0,1  |
| Сталь 10                        | 0,05             | 0,035 | 0,03 | 0,025 | 0,022 | 0,02 |



## 6.5. ТРЕНИЕ СМАЗАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ (табл. 6.13—6.19)

Таблица 6.13. Ориентировочные значения коэффициента трения при основных видах смазанного контакта [8]

| Вид фрикционного взаимодействия         | $f$       |
|-----------------------------------------|-----------|
| Сдвиг пленки смазки                     | 0,0003    |
| Граничная смазка                        | 0,02—0,01 |
| Гидродинамические радиальные подшипники | 0,005     |

Таблица 6.14. Коэффициент трения смазанных стальных поверхностей при комнатной температуре [11]

| Смазочный материал    | Длина молекулярной цепи | Точка плавления, °C | $f$  | Температура фазового перехода, °C |
|-----------------------|-------------------------|---------------------|------|-----------------------------------|
| <b>Парафины</b>       |                         |                     |      |                                   |
| Нонан                 | C <sub>9</sub>          | —54                 | 0,26 |                                   |
| Декан                 | C <sub>10</sub>         | —30                 | 0,23 | 17                                |
| Гексадекан            | C <sub>16</sub>         | 17                  | 0,16 | 44                                |
| Докозан               | C <sub>22</sub>         | 44                  | 0,11 | 66                                |
| Триаконтан            | C <sub>30</sub>         | 66                  | 0,11 |                                   |
| <b>Спирты</b>         |                         |                     |      |                                   |
| Бутиловый             | C <sub>4</sub>          | —89                 | 0,3  |                                   |
| Октиловый             | C <sub>8</sub>          | —16                 | 0,23 |                                   |
| Деканоловый           | C <sub>10</sub>         | 7                   | 0,16 |                                   |
| Цетиловый             | C <sub>16</sub>         | 49                  | 0,10 |                                   |
| <b>Жирные кислоты</b> |                         |                     |      |                                   |
| Уксусная              | C <sub>2</sub>          | 16                  | 0,5  |                                   |
| Пропионовая           | C <sub>3</sub>          | —22                 | 0,4  |                                   |
| Валериановая          | C <sub>5</sub>          | —35                 | 0,17 | 80                                |
| Капроновая            | C <sub>6</sub>          | —2                  | 0,12 | 90                                |
| Пеларгоновая          | C <sub>9</sub>          | 12                  | 0,11 | 95                                |
| Каприновая            | C <sub>10</sub>         | 31                  | 0,11 | 120                               |
| Лауриновая            | C <sub>12</sub>         | 44                  | 0,11 | 125                               |
| Миристиновая          | C <sub>14</sub>         | 58                  | 0,11 | 130                               |
| Пальмитиновая         | C <sub>16</sub>         | 64                  | 0,11 | 140                               |
| Стеариновая           | C <sub>18</sub>         | 69                  | 0,10 |                                   |

Таблица 6.15. Коэффициент трения некоторых материалов по нержавеющей стали в среде криогенных жидкостей [9]

| Материал                | Жидкая среда |         | Материал                          | Жидкая среда |         |
|-------------------------|--------------|---------|-----------------------------------|--------------|---------|
|                         | Азот         | Водород |                                   | Азот         | Водород |
| Графитофтористый металл | 0,18         | 0,22    | Графит (15%) + фторопласт-4 (85%) | 0,09         | 0,16    |
| Графит + фенол          | 0,04         | 0,06    | Графит (5%) + нейлон (95%)        | 0,06         | 0,15    |

Таблица 6.16. Ориентировочные значения коэффициента трения материалов для подшипников скольжения по стали при смешанной и несовершенной смазке [7]

| Материалы                                     | НВ, 10 <sup>7</sup> Па | $f$         |
|-----------------------------------------------|------------------------|-------------|
| <b>Бронзы</b>                                 |                        |             |
| Бр. ОЦН-3-7-5-1                               | 65                     | 0,013—0,016 |
| Бр. ОЦС 3-12-5                                | 60                     | 0,01—0,015  |
| Бр. ОЦС 5-5-5                                 | 60—75                  | 0,009       |
| Бр. ОЦС 6-6-3                                 | 60                     | 0,009       |
| Бр. ОЦС 4-4-2,5                               | 60                     | 0,016       |
| Бр. ОЦС 4-4-4                                 | 62                     | 0,016       |
| Бр. ОЦ 10-2                                   | 75—90                  | 0,008—0,060 |
| Бр. ОФ 10-1                                   | 80—100                 | 0,008—0,180 |
| Бр. ОФ 7-0,2                                  | 75                     | 0,01        |
| Бр. ОФ 6-5-0,15                               | 70—90                  | 0,12        |
| Бр. нМЦ 3-1                                   | 90                     | 0,015       |
| Бр. АМЦ 9-2                                   | 160                    | 0,006—0,012 |
| Бр. АМЦ 10-2                                  | 110                    | 0,006       |
| Бр. АЖ 9-4Л                                   | 120—140                | 0,012—0,040 |
| Бр. АЖ 9-4                                    | 110—160                | 0,012—0,040 |
| Бр. АЖМЦ 10-3-1,5                             | 120—140                | 0,012       |
| Бр. АМЦ 9-2Л                                  | 90—120                 | 0,012       |
| Бр. АЖН 10-4-4Л                               | 140—160                | 0,006—0,012 |
| Бр. АЖН 11-6-6                                | 250                    | 0,011       |
| Бр. С30                                       | 25                     | 0,008       |
| ЛС 59-1Л                                      | 90—40                  | 0,014       |
| ЛК 80-3Л                                      | 90—110                 | 0,01—0,19   |
| Бр. Б2                                        | 100                    | 0,016—0,05  |
| <b>Баббиты</b>                                |                        |             |
| Б6                                            | 32                     | 0,005       |
| Б16                                           | 30                     | 0,006       |
| Б83                                           | 27—30                  | 0,005       |
| БН                                            | 27—29                  | 0,006       |
| БТ                                            | 26                     | 0,009       |
| БКА                                           | 32                     | 0,004       |
| <b>Углеродные материалы</b>                   |                        |             |
| АМС-1                                         | 40                     | 0,1         |
| АМС-3                                         | 35                     | 0,065       |
| АФ-3Т                                         | 46                     | 0,087       |
| АГ 1500СО5                                    | 65—70<br>(по Шору)     | 0,063       |
| <b>Порошковые и керамические материалы</b>    |                        |             |
| ЖГР-1-20                                      | 60—100                 | 0,06—0,09   |
| ЖГР-2-20                                      | 50—80                  | 0,06—0,09   |
| ЖГР-3-Д                                       | 70—100                 | 0,04—0,07   |
| АЖГР-6-3                                      | 20—24                  | 0,005—0,008 |
| Бр. ОГ10-2                                    | 18—20                  | 0,004—0,008 |
| <b>Самосмазывающиеся полимерные материалы</b> |                        |             |
| АМАН-2                                        | 29—31                  | 0,12        |
| АМАН-4                                        | 27—29                  | 0,1         |
| Эстеран-33                                    | 22                     | 0,08        |
| АМАН-7                                        | 18—20                  | 0,05        |
| АМАН-13                                       | 14—16                  | 0,16        |
| АФ-Зам ( $p = 0,2$ МПа;<br>$v = 2$ м/с)       | 28—30                  | 0,12        |
| <b>Пластмассы</b>                             |                        |             |
| Полиамиды:                                    |                        |             |
| П-610                                         | 10—15*1                | 0,26—0,32   |
| Капрои                                        | 8—12                   | 0,1—0,15    |
| П-АК-93/7                                     | 10—12*1                | 0,24—0,25   |

| Материалы            | НВ    | $f$      |
|----------------------|-------|----------|
| Полиимиды:           |       |          |
| ПМ-67                | 20—30 | 0,35*2   |
| ПМ-69                | 20—27 | 0,40*2   |
| ПАМ 15-69            | 33    | 0,18*2   |
| Полиолефины          |       |          |
| Фторопласт-4         | 3—6   | 0,03—0,1 |
| Пентапласт           |       | 0,12     |
| Поликарбонаты днфлон | 10—11 | 0,3*2    |
| литевой              |       |          |
| Полиакрилаты         | 20    | 0,4*2    |

\*1 Твердость определена при нагрузке на индентор 365 Н.

\*2 Значения определены при отсутствии смазочного материала.

Таблица 6.17. Коэффициент трения в проточной воде [5] ( $p = 0,06$  МПа;  $v = 6$  м/с)

| Материал                                     | $f$       |
|----------------------------------------------|-----------|
| Бук и клен по бронзе при движении:           |           |
| параллельно волокнам                         | 0,25—0,26 |
| перпендикулярно волокнам                     | 0,12—0,23 |
| Эбонит по бронзе                             | 0,08—0,12 |
| Латунь по бронзе                             | 0,25—0,35 |
| Сталь по бронзе                              | 0,07—0,10 |
| Сталь с хромированной поверхностью по бронзе | 0,06      |
| Бронза по бронзе                             | 0,04      |
| Резина                                       | 0,22—0,26 |
| Текстолит по бронзе                          | 0,12—0,14 |

Таблица 6.18. Коэффициент трения по стали графита и нитрида бора при использовании их в качестве твердосмазочных покрытий [9]

| Материал                         | $f$    |        | Давление, Па        |
|----------------------------------|--------|--------|---------------------|
|                                  | Воздух | Вакуум |                     |
| Природный графит                 | 0,19   | 0,44   | $8 \cdot 10^{-7}$   |
| Пиролитический графит            | 0,18   | 0,50   | $2,7 \cdot 10^{-7}$ |
| Нитрид бора горячего прессования | 0,25   | 0,70   | $2,7 \cdot 10^{-7}$ |

Таблица 6.19. Коэффициенты трения покоя  $f_s$  и движения  $f$  материалов с рабочим слоем твердой смазки при трении по стали [9]

| Материал                          | Режим трения (давление, скорость) | $10^5$ Па |      | $3 \cdot 10^{-4}$ Па |     |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|------|----------------------|-----|
|                                   |                                   | $f_s$     | $f$  | $f_s$                | $f$ |
| АМАН-2                            | 0,2 МПа;<br>4 м/с                 | 0,44      | 0,18 | 0,1                  | 0,1 |
| М-801 (Мо — MoS <sub>2</sub> —Мо) | 0,78 МПа;<br>0,265 м/с            | 0,4—0,5   | 0,1  | 0,15                 | 0,5 |
| Мо—MoSe <sub>2</sub>              | 0,03—0,3 МПа;<br>0,02 м/с         | 0,13      | 0,12 | 0,1                  | 0,1 |

## 6.6. ТРЕНИЕ ПО ЛЬДУ И СНЕГУ (табл. 6.20—6.22)

Таблица 6.20. Коэффициент трения по льду и снегу [8]

| Вид трения           | $f$       |
|----------------------|-----------|
| По мокрому льду      | 0,02      |
| По гладкому льду     | 0,06      |
| Лыжи по снегу        | 0,10—0,30 |
| По шероховатому льду | 0,12      |
| По плотному снегу    | 0,20      |

Таблица 6.21. Коэффициент трения по льду при скорости 4 м/с [11]

| Материал | $t, ^\circ\text{C}$ |       |       |       |       |      |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|------|
|          | 0                   | —10   | —20   | —40   | —60   | —80  |
| Лед      | 0,02                | 0,035 | 0,050 | 0,075 | 0,085 | 0,09 |
| Эбонит   | 0,02                | 0,050 | 0,065 | 0,085 | 0,100 | 0,11 |
| Латунь   | 0,02                | 0,075 | 0,085 | 0,115 | 0,140 | 0,15 |

Примечание. Для несмазанной лыжи при  $-3^\circ\text{C}$   $f = 0,08$ , для смазанной  $f = 0,03$ .

Таблица 6.22. Коэффициент трения по снегу смазанной (вощенной) лыжи при скорости 0,1 м/с [11]

|                     |      |      |      |     |
|---------------------|------|------|------|-----|
| $t, ^\circ\text{C}$ | 0    | —3   | —10  | —40 |
| $f$                 | 0,04 | 0,09 | 0,18 | 0,4 |

## 6.7. ТРЕНИЕ В ВАКУУМЕ (табл. 6.23—6.26)

Таблица 6.23. Коэффициент трения стали 12Х18Н10Т в паре с другими сталями в условиях вакуума [9]

| Сталь | Давление $P$ , Па   | Система откачки | $t, ^\circ\text{C}$ | $\tau_0, 10^7$ Па | $\beta$ |
|-------|---------------------|-----------------|---------------------|-------------------|---------|
| P9    | —                   | —               | —                   | 6,43              | 0,232   |
| У7    | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | Масляная        | —                   | 2,54              | 0,32    |
| 40Х13 | —                   | —               | 20                  | 3,95              | 0,26    |
| ШХ15  | $6,5 \cdot 10^{-1}$ | —               | —                   | 5,75              | 0,159   |
| P9    | $6,5 \cdot 10^{-7}$ | Безмасляная     | —                   | 9,65              | 0,575   |
| P9    | $4 \cdot 10^{-5}$   | —               | 200                 | 9,65              | 0,545   |

Таблица 6.24. Трение чистых металлов при однократном скольжении на воздухе и в вакууме  $10^{-3}$  Па [9]

| Пары трения | Коэффициент трения |                               | Пары трения | Коэффициент трения |                               |
|-------------|--------------------|-------------------------------|-------------|--------------------|-------------------------------|
|             | на воздухе         | в вакууме после обезгаживания |             | на воздухе         | в вакууме после обезгаживания |
| Cu — Ni     | 0,45               | 1,50                          | Cu — Fe     | 0,51               | 0,75                          |
| Ta — Ni     | 0,23               | 0,90                          | Ta — Cu     | 0,44               | 0,43                          |
| W — Ni      | 0,21               | 1,36                          | W — Cu      | 0,34               | 0,41                          |

Таблица 6.25. Влияние остаточного давления в испытательной камере на коэффициент трения нержавеющей стали в одноименной паре

|                              |        |                   |                   |           |
|------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-----------|
| Остаточное давление, Па. . . | $10^5$ | $5 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $10^{-6}$ |
| Коэффициент трения . . . . . | 0,47   | 1,22              | 2,74              | 2,94      |

Таблица 6.26. Коэффициент трения металлов, дегазированных в вакууме [11]

| Металл              | Дегазированный металл | Металл после обработки | Металл после контакта с $O_2$ |
|---------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| Никель по вольфраму | 6                     | 6                      | 1                             |
| Никель по никелю    | 5—8                   | 5                      | 2,5                           |
| Медь по меди        | 4,8                   | 4,8                    | 0,7                           |
| Золото по золоту    | 4,5                   | 4,5                    | 2,8                           |

## 6.8. ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ (табл. 6.27—6.29)

Таблица 6.27. Ориентировочные значения коэффициента трения качения [8]

| Трущиеся сопряжения                  | $f_K$     |
|--------------------------------------|-----------|
| Подшипники качения                   | 0,0025    |
| Сопротивление свободному качению шин | 0,01      |
| Качение шара по резине               | 0,02—0,10 |
| Трение между колесом и рельсом:      |           |
| во влажную погоду                    | 0,09—0,15 |
| в дождь                              | 0,20      |
| в сухую погоду                       | 0,25—0,30 |
| Качение цилиндра по резине           | 0,10—0,30 |
| Шины:                                |           |
| на мокрых дорогах                    | 0,40      |
| на сухих дорогах                     | 0,70      |

Таблица 6.28. Коэффициент трения качения, определенный стандартным методом [12] по затуханию колебаний маятника со сферической опорой из стали ШХ15 [14]

| Материал                   | $f_K$               |
|----------------------------|---------------------|
| Сталь ШХ15                 | $2,2 \cdot 10^{-6}$ |
| Сталь ШХ15, необезжиренная | $2 \cdot 10^{-5}$   |
| Медь                       | $6 \cdot 10^{-4}$   |
| Стекло                     | $5 \cdot 10^{-5}$   |
| Кремний                    | $3 \cdot 10^{-5}$   |

Таблица 6.29. Значения коэффициента гистерезисных потерь [13] для ряда материалов, определенные стандартным [12] методом

| Материал               | $\epsilon \cdot 10^8$ |            |
|------------------------|-----------------------|------------|
|                        | в исходном состоянии  | отожженный |
| Кварц                  | 0,006                 | —          |
| Резина                 | 0,1                   | —          |
| Оргстекло              | 0,2                   | —          |
| Манганин               | 0,31                  | 0,016      |
| Копель                 | 0,31                  | 0,1        |
| Рений                  | 0,33                  | 0,024      |
| Никель-титановый сплав | 0,41                  | 0,43       |
| Алюмель                | 0,9                   | 0,07       |
| Хромель                | 0,95                  | 0,87       |
| Вольфрам               | 1,0                   | 0,18—0,35  |
| Бериллиевая бронза     | 1,0                   | 0,57       |
| Нихром                 | 1,2                   | 0,01       |
| Сталь                  | 1,2                   | 0,42       |
| Эленвар                | 1,3                   | 3,1        |
| Серебро                | 1,6                   | 31         |
| Алюминий               | 6,3                   | 2,1        |
| Медь                   | 7,8                   | 3,1        |
| Константан             | 31,4                  | 10         |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка. М.: Машгиз. 1960.
2. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение. 1971.
3. ГОСТ 23.002-78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
4. ГОСТ 23.202-78. Обеспечение износостойкости изделий. Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел при трении.
5. Зайцев А. К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. М.-Л.: Машгиз. 1947.
6. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбаров В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977.
7. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение. 1984.
8. Мур Д. Основы и применение трибоники: Пер. с англ. М.: Мир. 1978.
9. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. М.: Машиностроение. 1978. Кн. 1.
10. Физический энциклопедический словарь/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия. 1984.
11. Bowden F. P., Tabor D. The friction and lubrication of solids. Oxford: Clarendon Press. 1954. Pt. 1. P. 372—384.
12. ГОСТ 23.214-83. Обеспечение износостойкости изделий. Маятниковый метод измерения коэффициента трения качения.
13. Карагиоз О. В., Кочерян Э. Г., Измайлов В. П. Увеличение добротности вакуумированных крутильных систем путем отжига нити подвеса//Физ. и хим. обработки материалов. 1972. № 1. С. 87—90.
14. Силин А. А., Карагиоз О. В., Маркачов В. В., Измайлов В. П. О единстве механизма диссипации энергии при трении качения и других видах упругого деформирования твердых тел//Трение и износ. 1980. Т. 1, № 6. С. 957—964.

### 7.1. ВВЕДЕНИЕ

Скорость звука в газах и жидкостях, м/с,

$$v_0 = (k_s \rho_0)^{-1/2},$$

где  $\rho_0$  — невозмущенная плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $k_s$  — адиабатный коэффициент сжатия, Па<sup>-1</sup>. В газах

$$k_s = (\gamma p_0)^{-1},$$

где  $p_0$  — среднее давление в среде, Па,  $\gamma = c_p/c_v$  — отношение теплоемкостей. Для жидкостей  $k_s$  — эмпирический параметр. Разложение уравнения состояния  $p = p(\rho)$  в ряд по малым степеням сжатия  $s = (\rho - \rho_0)/\rho_0$  дает

$$p = p_0 + \rho_0 v_0^2 \left[ s + (n-1) \frac{s^2}{2} + \dots \right], \quad \text{где}$$

$$n = \frac{\rho_0}{v_0^2} \frac{dv^2}{d\rho} \Big|_{\rho=\rho_0} \quad \text{— адиабатический параметр квадратич-}$$

ной нелинейности (для газов  $\gamma \equiv n$ , для жидкостей часто используется нелинейный параметр  $B/A = n-1$ );  $v = v(\rho)$  — локальная скорость звука. В однородных газах и жидкостях, за исключением областей релаксации, дисперсия скорости звука мала; в области релаксации она может достигать нескольких десятков процентов. Во всех жидкостях вплоть до давлений  $\sim 10^2$  МПа скорость линейно растет с давлением. Почти во всех жидкостях (за исключением воды, некоторых расплавов металлов) скорость убывает с ростом температуры:  $-dv_0/dT = 2 \div 6$  м/(К·с).

В изотропных твердых телах скорость продольных волн  $v_l$

$$\rho_0 v_l^2 = \tilde{\lambda} + 2G = K + \frac{4}{3}G =$$

$$= \frac{G(4G - E)}{3G - E} = \frac{E(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} = \frac{3K(1 - \mu)}{1 + \mu};$$

поперечных (сдвиговых) или крутильных волн  $v_s$

$$\rho_0 v_s^2 = G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{3K(1 - \mu)}{2(1 + \mu)},$$

где  $\tilde{\lambda}$  — постоянная Ляме, Па;  $G$  — модуль сдвига, Па;  $K$  — модуль объемной упругости, Па;  $E$  — модуль Юнга, Па;  $\mu$  — коэффициент Пуассона (все параметры адиабатические). При распространении в твердых волноводах в общем случае имеется сильная дисперсия; например, для изгибной волны в пластине толщиной  $d$ , м,

$$v_{изг}^2 = \pi d f \left[ \frac{E}{3\rho_0(1 - \mu)^2} \right]^{1/2},$$

где  $f$  — частота, Гц. Для нулевой моды продольных колебаний тонкого (диаметр  $D \ll \lambda$  — длины волны) стержня дисперсия отсутствует:

$$\rho_0 v_{ст}^2 = E.$$

При колебаниях пластинки по толщине оценку первой резонансной частоты можно сделать по соотношению

$$f_p = v/2L,$$

где  $L$  — толщина пластинки, м;  $v$  — скорость соответствующей волны, м/с.

На свободной поверхности твердого тела могут распространяться недиспергирующие релеевские поверхностные акустические волны (ПАВ), скорость которых для изотропного тела  $v_R = av_s$ , где  $a = (0,87 + 1,12\mu)/(1 + \mu) < 1$ . Колебательные смещения из положения равновесия в этих ПАВ поляризованы в плоскости, нормальной к поверхности, содержащей волновой вектор. Деформации несут смешанный характер (объемные и сдвиговые). Глубина проникновения релеевских ПАВ порядка  $\lambda$ .

В произвольном направлении в кристаллах в общем случае могут распространяться три объемные волны: квазипродольная (QL) и две квазипоперечные — быстрая (FS) и медленная (SS) со скоростью  $\rho_0 v^2 = M$ , где  $M$  — действующий адиабатический модуль упругости, зависящий от направления распространения и поляризации волны. В таблицах нижний индекс — направление распространения, верхний — поляризация (направление колебательного смещения). В кубических кристаллах действующий модуль для разных типов волн:

$$L_{100}: M = c_{11}; \quad S_{100}: M = c_{44};$$

$$L_{110}: M = \frac{1}{2}(c_{11} + c_{12} + 2c_{44}); \quad S_{110}^{001}: M = c_{44};$$

$$L_{111}: M = \frac{1}{3}(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44});$$

$$S_{110}^{1\bar{1}0}: M = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}),$$

где  $c_{ij}$  — упругие постоянные кристалла. Для пьезоэлектрических (магнитных) кристаллов есть соответствующие добавки к  $v$ ; металлизация поверхности приводит к изменению скорости релеевской ПАВ:  $\Delta v_R/v_R \approx \kappa^2/2$ , где  $\kappa$  — коэффициент электроупругой связи, определяющий долю связанной электроупругой энергии. На поверхности пьезоэлектрика может распространяться сдвиговая ПАВ Гуляева — Блюстейна, глубина проникновения которой порядка нескольких десятков  $\lambda$ . В кристаллах с сильной анизотропией скорости направление потока энергии не совпадает с направлением нормали к волновому фронту, что приводит к несовпадению по направлению и величине фазовой и групповой скоростей.

Точность прецизионных измерений абсолютного значения скорости звука в настоящее время высока (погрешность  $\sim 10^{-6}$ ). Однако такие результаты могут рассматриваться лишь для однородных чистых образцов (в кристаллах важна еще точность ориентации).

**Отражение, преломление, прохождение.** Коэффициент отражения по энергии плоской волны от границы раздела сред с удельными волновыми сопротивлениями  $z_1 = \rho_1 v_1$  и  $z_2 = \rho_2 v_2$

$$R = \left( \frac{z_1 \cos \theta_2 - z_2 \cos \theta_1}{z_1 \cos \theta_2 + z_2 \cos \theta_1} \right)^2,$$

где  $\theta_1$  — угол падения;  $\theta_2$  — угол преломления ( $v_1 \sin \theta_2 = v_2 \sin \theta_1$ ). Коэффициент прохождения  $T = 1 - R$ ; амплитудные коэффициенты  $r = R^{1/2}$ ,  $t = T^{1/2}$ .

**Затухание.** Для плоской волны коэффициент затухания по амплитуде  $\alpha$ , м<sup>-1</sup>, может быть представлен в виде

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left[ \frac{p(0)}{p(L)} \right],$$

где  $p(0)$ ,  $p(L)$  — амплитуды звукового давления в исходной точке и на расстоянии  $L$ , м. Иногда для измерения  $\alpha$  используют единицу дБ/м, в этом случае

$$\alpha = \frac{1}{L} 20 \lg \frac{p(0)}{p(L)}.$$

Связь этих коэффициентов затухания:  $\alpha$  (дБ/м) =  $8,686 \alpha$  ( $\text{м}^{-1}$ ). Часто используется временной коэффициент затухания  $\Gamma$ ,  $\text{с}^{-1}$ :  $\Gamma = \alpha v$ , где  $\alpha$  выражено в  $\text{м}^{-1}$ ,  $v$  в м/с, для  $\Gamma$  в дБ/мкс:  $\Gamma = 8,686 \cdot 10^{-6} \alpha v$ . Помимо  $\alpha$  и  $\Gamma$  характеристиками затухания являются безразмерные добротность  $Q = \pi f / \alpha v$  и логарифмический декремент затухания  $\delta = \pi / Q$ . В отличие от затухания, включающего рассеяние звука на неоднородностях и другие виды не-диссипативных потерь, поглощение включает лишь диссипативные потери. Для газов и жидкостей коэффициент поглощения  $\alpha$ ,  $\text{м}^{-1}$ ,

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho_0 v^3} \left( \frac{4}{3} \eta + \eta' + \frac{\gamma - 1}{c_p} \kappa \right) = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho_0 v^3} b,$$

где  $\rho_0$  — плотность,  $\text{кг/м}^3$ ;  $f$  — частота, Гц;  $\eta$  — динамическая вязкость, Па·с;  $\eta'$  — коэффициент объемной вязкости, Па·с;  $v$  — скорость звука, м/с;  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м);  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(К·г). Для сжиженных газов, расплавленных металлов, ртути  $\eta' \approx 0$ . Во всех остальных случаях  $\eta'$  — экспериментально определяемая величина, обусловленная релаксационными процессами в среде. Вне области релаксации  $\alpha/f^2 = \text{const}$ ; в области релаксации  $\alpha$  имеет максимум, а  $\alpha/f^2$  характерно (в виде плавной «ступеньки») уменьшается с частотой. Увеличение амплитуды волны сопровождается ростом затухания из-за более быстрого поглощения возникающих в волне высших гармоник; это нелинейное затухание становится заметным при амплитудах звукового давления в плоской волне:  $p' > 2\pi f b$ .

В поликристаллических твердых телах имеется много механизмов затухания (рассеяние на зернах, теплопроводность между зернами и др.); затухание сильно зависит от структуры. В высококачественных кристаллах диэлектриков в области комнатных температур затухание определяется взаимодействием звука с тепловыми фононами (затухание Ландау — Румера для ВЧ-звука и Ахизера для более низких частот); при  $T \leq 3 \div 40$  К независимое от температуры остаточное затухание обусловлено взаимодействием с дефектами. В металлах и полупроводниках (особенно пьезополупроводниках) имеется электронное затухание, особенно четко проявляющееся в области низких температур и исчезающее при переходе в сверхпроводящее состояние. В магнитных материалах и кристаллах значительное поглощение обусловлено взаимодействием с доменными стенками и спиновыми возбуждениями. Частотная зависимость затухания носит, как правило, сложный характер. В высококачественных кристаллах в области высоких ультразвуковых и гиперзвуковых частот для объемных волн эта зависимость часто бывает квадратичной. В поликристаллических материалах в области низких ультразвуковых частот часто  $Q = \text{const}$  и  $\alpha/f = \text{const}$ . В области фазовых переходов затухание резко увеличивается. Увеличение амплитуды звука сопровождается, как правило, увеличением затухания (амплитудно-зависимое затухание).

Наиболее точные измерения затухания имеют погрешность несколько процентов; большинство измерений, однако, проведено с погрешностью 10—20%. Из-за чувствительности затухания к структурным и примесным особенностям образцов различие в результатах разных авторов может существенно превышать указанную погрешность. С общими вопросами акустики можно ознакомиться по [1, 4, 33, 48, 87, 132, 135, 136, 141].

## 7.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ГАЗАХ И ПАРАХ (табл. 7.1—7.4, рис. 7.1—7.12)

Таблица 7.1. Скорость звука в газах и парах

| Вещество            | $t$ , °C | $f$ , кГц | $v$ , м/с | $\Delta v / \Delta t$ , м/(К·с) | Литература |
|---------------------|----------|-----------|-----------|---------------------------------|------------|
| Азот                | 0        | —         | 334,0     | 0,6                             | [2]        |
|                     | 19,1     | —         | 349,0     | —                               | [2]        |
| Аргон               | 0        | —         | 319,0     | 0,56                            | [2]        |
|                     | 20       | —         | 321       | —                               | [2]        |
|                     | 30,2     | 83,8      | 325,23    | —                               | [3]        |
| Аммиак              | 0        | —         | 415       | —                               | [2]        |
|                     | 18       | —         | 428,2     | —                               | [2]        |
| Амилловый спирт     | 136      | —         | 218,8     | —                               | [2]        |
| Ацеталь             | 30       | 59,6      | 257       | —                               | [2]        |
| Ацетон              | 18       | —         | 327       | —                               | [2]        |
|                     | 97,1     | —         | 238,6     | 0,32                            | [4]        |
| Бензол              | 134      | —         | 251,2     | —                               | [4]        |
|                     | 97,1     | —         | 202,0     | 0,3                             | [5]        |
|                     | 134      | 95        | 212,6     | —                               | [2]        |
| Бромистый водород   | 0        | —         | 200       | —                               | [5]        |
| Бром                | 0        | —         | 135       | —                               | [2]        |
| Бутиловый спирт:    | 134      | 95        | 215       | —                               | [2]        |
|                     |          | 95        | 180       | —                               | [2]        |
| Воздух              | 0        | —         | 331,45    | 0,59                            | [6]        |
| Водород             | 0        | —         | 1284      | 2,2                             | [2]        |
|                     | 18       | —         | 1301      | —                               | [2]        |
|                     | 100      | —         | 1463      | —                               | [2]        |
| Водяной пар         | 134      | —         | 494       | —                               | [5]        |
| Винилацетат         | 134      | —         | 203       | —                               | [2]        |
| Гелий               | 0        | —         | 965       | 0,8                             | [2]        |
|                     | 30       | 83,8      | 1056      | —                               | [3]        |
|                     | 134      | 94        | 199,6     | —                               | [2]        |
| Гексан              | 0        | —         | 890       | 1,6                             | [5]        |
| Дейтерий            | 0        | —         | 213       | 0,47                            | [2]        |
|                     | 20       | 111       | 221,5     | —                               | [7]        |
|                     | 100      | 111       | 248,5     | —                               | [7]        |
| Диметиловый эфир    | 97,1     | —         | 274       | —                               | [5]        |
| Дипропиловый эфир   | 97,1     | —         | 194       | —                               | [5]        |
| Дихлорэтан          | 97,1     | —         | 181       | 0,24                            | [5]        |
|                     | 134      | —         | 190       | —                               | [5]        |
| Диэтиловый эфир     | 97,1     | —         | 206       | 0,3                             | [5]        |
|                     | 134      | —         | 217       | —                               | [5]        |
| Закись азота        | 0        | —         | 263       | 0,5                             | [5]        |
|                     | 19       | 93,8      | 273       | —                               | [7]        |
|                     | 109      | 93,8      | 310       | —                               | [7]        |
| Иодистый водород    | 0        | —         | 157       | —                               | [2]        |
| Иодистый этил       | 76       | 465       | 162       | —                               | [2]        |
| Иодистый метил      | 43       | 465       | 154       | —                               | [2]        |
| Иод                 | 0        | —         | 108       | —                               | [2]        |
| Изопропиловый спирт | 97,1     | 95        | 255       | 0,4                             | [2]        |
|                     | 134      | 95        | 270,2     | —                               | [2]        |
| Кислород            | 0        | 43,2      | 314       | —                               | [1]        |
| Криптон             | 30,3     | 83,8      | 224,4     | —                               | [3]        |
| Метан               | —87      | 588       | 353       | —                               | [8]        |
|                     | —20      | 588       | 411       | —                               | [8]        |
|                     | 0        | —         | 430       | —                               | [5]        |
| Метиловый спирт     | 97,1     | 95        | 335       | 0,46                            | [2]        |
|                     | 134      | —         | 352,6     | —                               | [2]        |
| Метилциклогексан    | 134      | —         | 185       | —                               | [2]        |
| Метиловый эфир      | 97,1     | 95        | 273,9     | —                               | [2]        |
| Неон                | 0        | —         | 433,4     | —                               | [2]        |
|                     | 30,5     | 83,8      | 461,3     | —                               | [2]        |
| Оксид азота         | 10       | —         | 324       | —                               | [3]        |
|                     | 16       | —         | 332,4     | —                               | [2]        |

Продолжение табл. 7.1

| Вещество                 | $t, ^\circ\text{C}$ | $f, \text{кГц}$ | $v, \text{м/с}$ | $\Delta v / \Delta t, \text{м/(}^\circ\text{C)}$ | Литература |
|--------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|------------|
| Оксид углерода           | 0                   | —               | 338             | 0,6                                              | [2]        |
|                          | 1000                | 27,4            | 717             | —                                                | [9]        |
|                          | 1800                | 27,4            | 909             | —                                                | [9]        |
| Пентан                   | 134                 | —               | 220             | —                                                | [2]        |
| Пропиловый спирт         | 134                 | 95              | 243,9           | —                                                | [2]        |
| Пропионовая кислота      | 146                 | —               | 232             | —                                                | [2]        |
| Пропиловый эфир          | 97,1                | 50              | 194             | —                                                | [2]        |
| Сероуглерод              | 55                  | 59,5            | 205             | —                                                | [2]        |
|                          | 97,1                | 50              | 220,1           | —                                                | [5]        |
| Сероводород              | 0                   | —               | 289,3           | —                                                | [5]        |
| Светильный газ           | 0                   | —               | 453             | —                                                | [5]        |
| Углекислый газ           | 0                   | —               | 256,7           | —                                                | [2]        |
|                          | 20                  | 58,5            | 274,6           | —                                                | [2]        |
|                          | 25                  | 53              | 282             | —                                                | [10]       |
|                          | 100                 | 53              | 311             | —                                                | [10]       |
|                          | 500                 | 53              | 425             | —                                                | [10]       |
| Фтористый кремний        | 0                   | —               | 167             | —                                                | [5]        |
| Хлор                     | 0                   | —               | 206             | —                                                | [2]        |
| Хлористый водород        | 0                   | —               | 296             | —                                                | [2]        |
| Хлористый метилен        | 97,1                | 95              | 204             | 0,24                                             | [5]        |
|                          | 134                 | 95              | 213             | —                                                | [5]        |
| Хлористый этил           | 18                  | —               | 428,2           | —                                                | [2]        |
| Хлороформ                | 97,1                | 95              | 171,4           | —                                                | [5]        |
|                          | 134                 | 95              | 179,7           | —                                                | [2]        |
| Циклогексан              | 97,1                | —               | 191,3           | 0,3                                              | [5]        |
|                          | 134                 | 95              | 201,9           | —                                                | [2]        |
| Четыреххлористый углерод | 97,1                | 95              | 145,2           | —                                                | [5]        |
|                          | 134                 | —               | 153,6           | —                                                | [2]        |
| Четырехфтористый углерод | 22                  | —               | 178,2           | —                                                | [2]        |
| Этан                     | 10                  | —               | 308             | —                                                | [5]        |
| Этилацетат               | 97,1                | —               | 189,2           | 0,27                                             | [5]        |
|                          | 134                 | 95              | 198,8           | —                                                | [5]        |
| Этилен                   | 0                   | —               | 317             | —                                                | [5]        |
|                          | 20                  | 59,5            | 329             | —                                                | [2]        |
| Этилметилкетон           | 134                 | —               | 223             | —                                                | [5]        |
| Этиловый спирт           | 97,1                | 95              | 269,1           | 0,4                                              | [2]        |
|                          | 134                 | 95              | 284,4           | —                                                | [2]        |
| Этиловый эфир            | 97,1                | —               | 206,5           | 0,3                                              | [2]        |
|                          | 134                 | —               | 217,4           | —                                                | [2]        |

Таблица 7.2. Зависимость скорости звука в сухом воздухе от температуры при атмосферном давлении [11]

|                     |     |     |     |           |     |     |           |     |
|---------------------|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|
| $t, ^\circ\text{C}$ | -30 | -20 | -10 | 0         | 10  | 20  | 30        | 100 |
| $v, \text{м/с}$     | 313 | 319 | 325 | 331,45[6] | 338 | 344 | 350,70[3] | 386 |

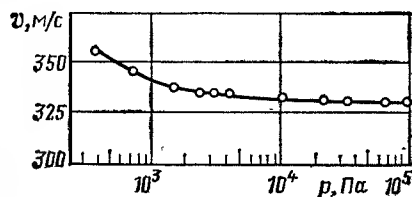
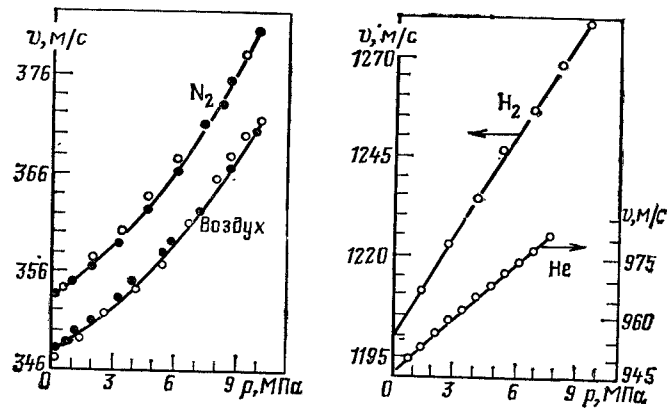
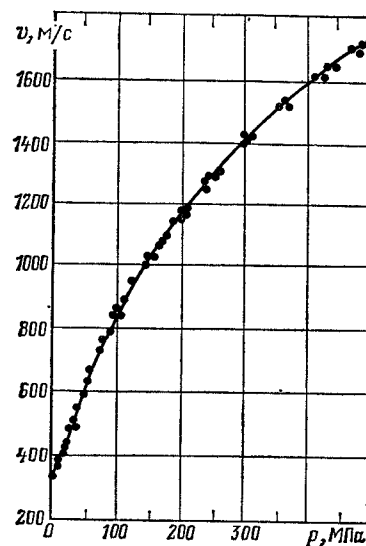
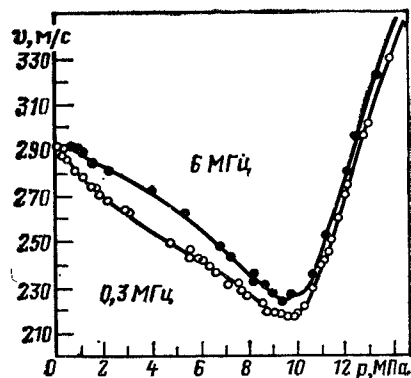
Рис. 7.1. Скорость звука в воздухе, свободном от  $\text{CO}_2$ , при атмосферном и более низком давлении ( $t=0^\circ\text{C}$ ;  $f=971 \text{ кГц}$ ) [12]

Рис. 7.2. Зависимость скорости звука в воздухе, азоте, гелии и водороде от давления [13]:

● —  $f=486 \text{ кГц}$ ; ○ —  $f=286 \text{ кГц}$ Рис. 7.3. Зависимость скорости звука в азоте от давления ( $t=20^\circ\text{C}$ ;  $f=310 \text{ кГц}$ ) [14]Рис. 7.4. Зависимость скорости звука в углекислом газе от давления ( $t=50,8^\circ\text{C}$ ) [15]

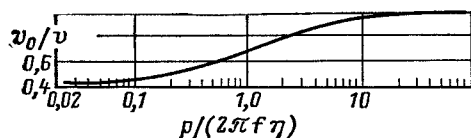


Рис. 7.5. Дисперсия скорости звука в воздухе ( $f=100 \div 200$  кГц) [16]

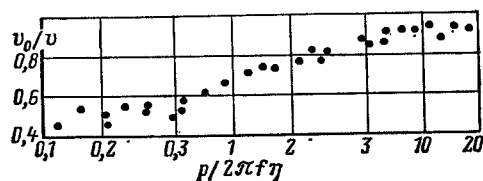


Рис. 7.6. Дисперсия скорости звука в водороде ( $f=200$  кГц) [16]

Таблица 7.3. Коэффициент затухания звука в газах и парах

| Вещество                 | $t, ^\circ\text{C}$ | $f, \text{кГц}$ | $p_0, 10^5 \text{ Па}$ | $\alpha, \text{м}^{-1}$ | $\alpha/f^2, 10^{-11} \text{ с}^2/\text{м}$ | Литература |
|--------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|------------|
| Азот                     | 19,9                | 598,9           | 0,98                   | 4,9                     | 1,35                                        | [17]       |
| Аргон                    | 20                  | 4250            | 1,01                   | 3,42                    | 1,9                                         | [18]       |
|                          | —                   | 500             | 0,58                   | 8,34                    | —                                           | [19]       |
|                          | —                   | 500             | 0,184                  | 25,5                    | —                                           | [19]       |
| Ацетон                   | —                   | 97,8            | —                      | 50                      | 525                                         | [2]        |
| Бензол                   | —                   | 97,8            | —                      | 100                     | 1050                                        | [2]        |
| Водород                  | 19,9                | 598,9           | 1,01                   | 12,9                    | 3,58                                        | [20]       |
| Воздух                   | —                   | 1940            | —                      | 69,7                    | 1,85                                        | [21]       |
| Гелий                    | 17,5                | 598,9           | 1                      | 10,7                    | 2,96                                        | [17, 20]   |
| Иодистый метил           | —                   | 97,8            | —                      | 15                      | 158                                         | [2]        |
| Иодистый этил            | —                   | 97,8            | —                      | 45                      | 474                                         | [2]        |
| Кислород                 | 19,6                | 598,9           | 1                      | 6,0                     | 1,68                                        | [20]       |
| Ксенон                   | —                   | 500             | 0,55                   | —                       | 0,15                                        | [19]       |
|                          | —                   | 500             | 0,091                  | —                       | 0,93                                        | [19]       |
| Метиловый спирт          | —                   | 97,8            | —                      | 5                       | 52,5                                        | [2]        |
| Неон                     | 19                  | 304,4           | 0,66                   | —                       | 5,82                                        | [20]       |
| Оксид азота              | 16,3                | 598,9           | 0,96                   | 6,6                     | 1,83                                        | [20]       |
| Оксид углерода           | 18,7                | 304,4           | 0,86                   | —                       | 5,78                                        | [20]       |
| Сероуглерод              | —                   | 97,8            | —                      | 120                     | 1270                                        | [2]        |
| Углекислый газ           | 16,6                | 304,4           | 0,99                   | 24                      | 27,1                                        | [20]       |
| Хлористый метилен        | —                   | 97,8            | —                      | 70                      | 740                                         | [2]        |
| Хлороформ                | —                   | 97,8            | —                      | 70                      | 740                                         | [2]        |
| Четыреххлористый углерод | —                   | 97,8            | —                      | 35                      | 370                                         | [2]        |
| Этиловый спирт           | —                   | 97,8            | —                      | 70                      | 740                                         | [2]        |
| Этиловый эфир            | —                   | 97,8            | —                      | 20                      | 210                                         | [2]        |

Таблица 7.4. Затухание звука в воздушно-водном тумане, дБ/с [22]

| $f, \text{кГц}$ | Концентрация воды, г/м <sup>3</sup> |      |      |      |      |
|-----------------|-------------------------------------|------|------|------|------|
|                 | 0,26                                | 0,46 | 0,52 | 0,86 | 1,03 |
| 0,5             | 0,2                                 | 0,4  | 0,3  | 0,2  | 1,0  |
| 1,0             | 0,5                                 | 0,8  | 1,5  | 3,0  | 3,0  |
| 2,0             | 2,0                                 | 4,6  | 6,0  | 11,0 | 22,6 |
| 4,0             | 7,0                                 | 15,5 | 16,0 | 30,5 | 37,0 |
| 6,0             | 11,0                                | 25,0 | 26,0 | 51,0 | 58,0 |

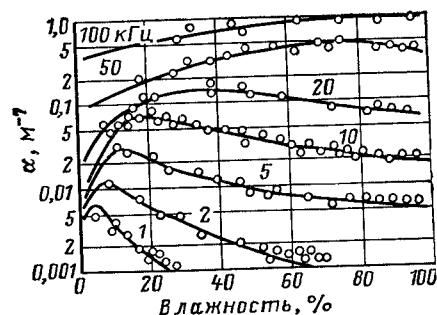


Рис. 7.7. Затухание звука в воздухе при разной частоте в зависимости от относительной влажности [23]

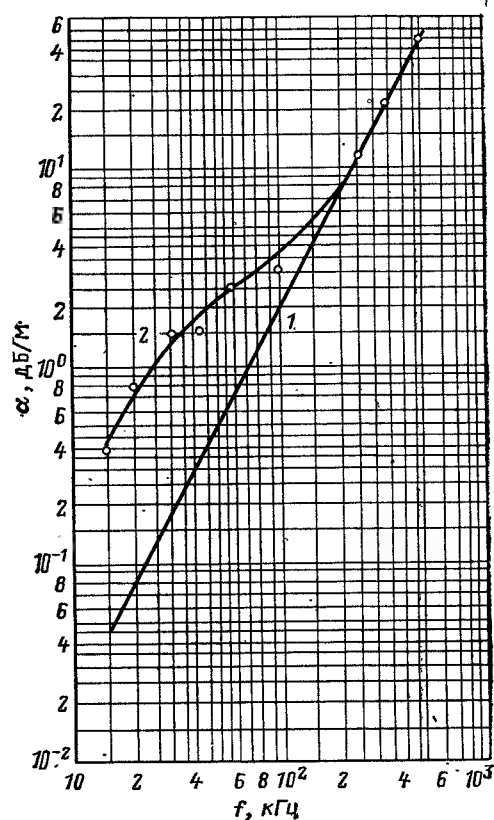


Рис. 7.8. Затухание звука на высоких звуковых и ультразвуковых частотах в сухом (1) и влажном (относительная влажность 37%) (2) воздухе при  $t=26,5^\circ\text{C}$  [24]

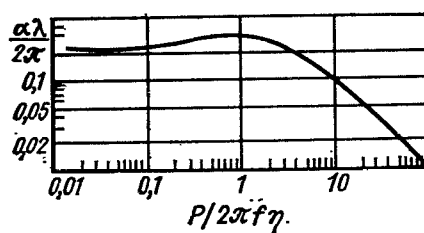


Рис. 7.9. Дисперсия коэффициента поглощения в воздухе ( $f=100 \div 200$  кГц) [16]

7.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ  
(табл. 7.5—7.15, рис. 7.13—7.26)

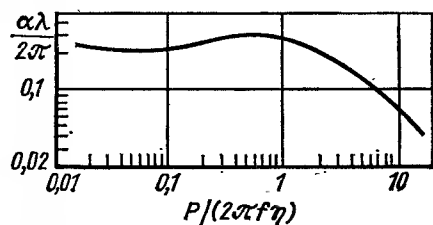


Рис. 7.10. Дисперсия коэффициента поглощения в аргоне ( $f=100\div 600$  кГц) [16]

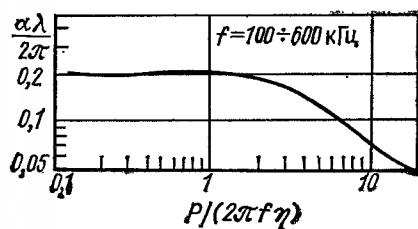


Рис. 7.11. Дисперсия коэффициента поглощения в водороде [16]

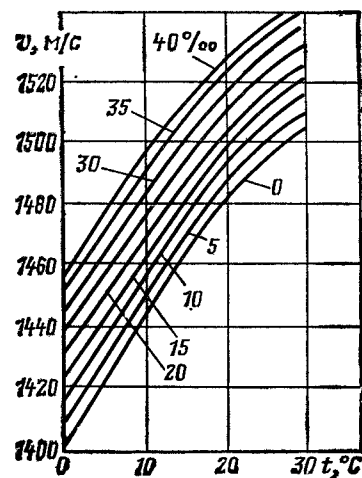


Рис. 7.12. Зависимость скорости звука в морской воде от температуры при различной концентрации солей [53]

Таблица 7.5. Скорость звука в сжиженных газах вблизи температуры кипения

| Вещество | $T$ , К | $v$ , м/с | Литература | Вещество                  | $T$ , К | $v$ , м/с | Литература |
|----------|---------|-----------|------------|---------------------------|---------|-----------|------------|
| Азот     | 65      | 1007      | [1]        | Гелий                     | 2,18    | 221,7     | [30]       |
|          | 70      | 929       | [25]       |                           | 2,5     | 223,3     | [30]       |
|          | 76      | 869       | [25]       |                           | 3,0     | 220       | [31]       |
|          | 77      | 867       | [1]        |                           | 4,22    | 179,8     | [30]       |
| Аргон    | 64      | 1322      | [26]       |                           | 4,223   | 180,63    | [29]       |
|          | 78      | 1255      | [26]       | Гелий II<br>(второй звук) | 1,63    | 20        | [32]       |
|          | 84      | 863       | [25]       |                           | 2,18    | 3,4       | [32]       |
|          | 87      | 837       | [25]       | Кислород                  | 53      | 1130      | [33]       |
| Водород  | 14,8    | 1340      | [27]       |                           | 60      | 1119      | [34]       |
|          | 16,5    | 1265      | [27]       |                           | 70      | 1094      | [34]       |
|          | 18,0    | 1260      | [27]       |                           | 80      | 988       | [1]        |
|          | 20,3    | 1127      | [28]       |                           | 85      | 948       | [1]        |
| Гелий    | 0,985   | 237,66    | [29]       |                           | 89,6    | 911       | [25]       |
|          | 1,08    | 237,67    | [29]       | Метан                     | 94,9    | 1545      | [35]       |
|          | 1,76    | 231,4     | [30]       |                           | 111,4   | 1418      | [35]       |



Таблица 7.6. Скорость звука в жидкостях при 20°С

| Вещество                    | $v$ , м/с | $\Delta v / \Delta t$ ,<br>м/(°С · с) | Литература | Вещество                   | $v$ , м/с | $\Delta v / \Delta t$ ,<br>м/(°С · с) | Литература |
|-----------------------------|-----------|---------------------------------------|------------|----------------------------|-----------|---------------------------------------|------------|
| Акролен                     | 1190      | —4,1                                  | [36]       | Диэтиланилин               | 1482      | —4,0                                  | [38]       |
| Алил хлористый (28°С)       | 1088      | —                                     | [37]       | Диэтиленгликоль (25°С)     | 1586      | —2,4                                  | [42]       |
| Амилацетат (26°С)           | 1168      | —                                     | [37]       | Диэтилкарбонат (28°С)      | 1173      | —                                     | [37]       |
| Амил бромистый              | 981       | —                                     | [38]       | Диэтилкетон (25°С)         | 1218      | —                                     | [36]       |
| Амилформиат                 | 1223      | —4,2                                  | [36]       | Диэтиловый эфир            | 1008      | —5,4                                  | [38]       |
| Анилин                      | 1659      | —4,0                                  | [39]       | Диэтилфталат (23°С)        | 1471      | —                                     | [37]       |
| Ацеталь (24°С)              | 1378      | —                                     | [37]       | Изопропилбензол            | 1342      | —                                     | [38]       |
| Ацетилацетон                | 1383      | —5,2                                  | [38]       | Индан                      | 1475      | —                                     | [38]       |
| Ацетил хлористый            | 1060      | —                                     | [38]       | Иодбензол                  | 1114      | —2,7                                  | [41]       |
| Ацетон                      | 1189      | —4,3                                  | [39]       | $\alpha$ -Ионон            | 1432      | —                                     | [38]       |
| Ацетонилацетон              | 1416      | —4,8                                  | [38]       | Карвакрол                  | 1475      | —5,0                                  | [38]       |
| Ацетонитрил                 | 1304      | —5,0                                  | [38]       | Кислота:                   |           |                                       |            |
| Ацетоуксусный эфир (25,5°С) | 1417      | —                                     | [37]       | валериановая               | 1244      | —4,8                                  | [38]       |
| Ацетофенон                  | 1496      | —3,7                                  | [37]       | каприловая                 | 1331      | —5,0                                  | [38]       |
| Бензальдегид                | 1479      | —4,0                                  | [38]       | капроновая                 | 1280      | —5,0                                  | [47]       |
| Бензилацетон                | 1514      | —                                     | [38]       | малеиновая                 | 1352      | —3,8                                  | [38]       |
| Бензил хлористый            | 1420      | —4,6                                  | [38]       | масляная                   | 1203      | —4,8                                  | [38]       |
| Бензоил хлористый (28°С)    | 1318      | —                                     | [37]       | муравьиная                 | 1287      | —                                     | [38]       |
| Бензол                      | 1324      | —4,6                                  | [39]       | олеиновая (45°С)           | 1333      | —3,3                                  | [46]       |
| Бензол тяжелый              | 1238      | —4,25                                 | [40]       | пальметиновая              | 1328      | —                                     | [47]       |
| Бромаль                     | 966       | —3,4                                  | [38]       | (62,1°С)                   |           |                                       |            |
| Бромбензол                  | 1170      | —3,12                                 | [41]       | пировиноградная            | 1471      | —                                     | [38]       |
| $\alpha$ -Бромнафталин      | 1372      | —3,1                                  | [39]       | пропионовая                | 1176      | —5,0                                  | [38]       |
| Бромоформ                   | 931       | —2,2                                  | [41]       | серная (15°С)              | 1440      | —                                     | [48]       |
| <i>n</i> -Бутилацетат       | 1226      | —4,1                                  | [36]       | тиоуксусная                | 1168      | —                                     | [38]       |
| <i>изо</i> -Бутилацетат     | 1182      | —4,0                                  | [36]       | уксусная                   | 1150      | —                                     | [38]       |
| Бутил:                      |           |                                       |            | фумаровая                  | 1303      | —3,5                                  | [49]       |
| бромистый                   | 990       | —4,0                                  | [38]       | элаидиновая (45°С)         | 1346      | —3,5                                  | [49]       |
| иодистый                    | 977       | —3,6                                  | [38]       | энантовая                  | 1312      | —5,0                                  | [38]       |
| хлористый                   | 1133      | —4,6                                  | [38]       | Коричный альдегид          | 1554      | —3,1                                  | [42]       |
| 2,3-Бутиленгликоль (25°С)   | 1484      | —                                     | [42]       | (25°С)                     |           |                                       |            |
| Бутилформиат                | 1215      | —4,1                                  | [36]       | <i>орто</i> -Крезол (25°С) | 1506      | —3,5                                  | [42]       |
| Вода                        | 1482,7    | +3,1                                  | [43]       | Кротоновый альдегид        | 1288      | —4,1                                  | [36]       |
| Вода тяжелая (25°С)         | 1399      | +2,8                                  | [44]       | <i>мета</i> -Ксилол        | 1344      | —4,1                                  | [36]       |
| Гексан                      | 1083      | —                                     | [38]       | <i>n</i> -Ксилол           | 1330      | —4,8                                  | [38]       |
| Гексил:                     |           |                                       |            | <i>орто</i> -Ксилол        | 1364      | —3,8                                  | [36]       |
| иодистый                    | 1081      | —3,2                                  | [38]       | Линалоол                   | 1341      | —                                     | [38]       |
| хлористый                   | 1221      | —4,2                                  | [38]       | Мезитилен                  | 1362      | —4,8                                  | [38]       |
| Гемеллитол                  | 1372      | —                                     | [38]       | <i>N</i> -Метиланилин      | 1586      | —                                     | [38]       |
| Гептан                      | 1162      | —4,5                                  | [38]       | Метилацетат                | 1182      | —4,7                                  | [36]       |
| Гептанон                    | 1207      | —                                     | [38]       | 2-Метилбутанол (30°С)      | 1225      | —                                     | [50]       |
| 1-Гептен                    | 1128      | —                                     | [45]       | Метилгексалин (22,5°С)     | 1528      | —                                     | [37]       |
| Геранилацетат (28°С)        | 1328      | —                                     | [37]       | Метилгексилкетон (24°С)    | 1324      | —                                     | [37]       |
| Гидринден                   | 1403      | —                                     | [38]       | Метилен:                   |           |                                       |            |
| Глицерин                    | 1895      | —1,9                                  | [36]       | бромистый                  | 963       | —2,6                                  | [41]       |
| 1-Децен                     | 1250      | —                                     | [45]       | иодистый                   | 973       | —1,9                                  | [41]       |
| Децил хлористый             | 1318      | —4,2                                  | [38]       | хлористый                  | 1093      | —3,9                                  | [41]       |
| Диамилловый эфир (26°С)     | 1153      | —                                     | [37]       | Метилизопропилбензол       | 1308      | —                                     | [37]       |
| Дибромэтилен                | 1009      | —                                     | [38]       | (28°С)                     |           |                                       |            |
| Диацетил (25°С)             | 1236      | —4,5                                  | [42]       | Метил иодистый             | 834       | —                                     | [38]       |
| <i>цис</i> -Дибромэтилен    | 957       | —2,4                                  | [46]       | Метилпропионат (24,5°С)    | 1215      | —                                     | [37]       |
| <i>транс</i> -Дибромэтилен  | 936       | —2,2                                  | [46]       | Метилсалицилат (28°С)      | 1408      | —                                     | [37]       |
| Диметиланнлин               | 1509      | —3,6                                  | [38]       | Метилциклогексан           | 1247      | —5,6                                  | [38]       |
| Диоксан                     | 1389      | —6,2                                  | [38]       | 2-Метилциклогексанол       | 1421      | —                                     | [37]       |
| Дипентен (23,8°С)           | 1328      | —                                     | [37]       | (25,5°С)                   |           |                                       |            |
| Дипропиловый эфир           | 1112      | —                                     | [38]       | 4-Метилциклогексанол       | 1387      | —                                     | [37]       |
| Дифенилметан                | 1501      | —                                     | [37]       | (25,5°С)                   |           |                                       |            |
| Дифениловый эфир (24°С)     | 1469      | —                                     | [37]       | 2-Метилциклогексанон       | 1353      | —                                     | [37]       |
| <i>мета</i> -Дихлорбензол   | 1232      | —                                     | [37]       | Метилэтилкетон             | 1207      | —5,0                                  | [38]       |
| (28°С)                      |           |                                       |            | Монохлорнафталин (27°С)    | 1462      | —                                     | [37]       |
| <i>орто</i> -Дихлорбензол   | 1295      | —                                     | [37]       | Морфолин (25°С)            | 1442      | —3,7                                  | [42]       |
| Дихлорэтан (23°С)           | 1240      | —                                     | [37]       | Никотин                    | 1491      | —5,0                                  | [38]       |
| <i>цис</i> -Дихлорэтилен    | 1090      | —3,7                                  | [46]       | Нитробензол                | 1475      | —3,4                                  | [36]       |
| <i>транс</i> -Дихлорэтилен  | 1031      | —3,7                                  | [46]       | Нитрометан                 | 1346      | —4,1                                  | [38]       |

| Вещество                  | $\nu$ , м/с | $\Delta\nu/\Delta t$ ,<br>м/(°С · с) | Литература | Вещество                     | $\nu$ , м/с | $\Delta\nu/\Delta t$ ,<br>м/(°С · с) | Литература |
|---------------------------|-------------|--------------------------------------|------------|------------------------------|-------------|--------------------------------------|------------|
| <i>мета</i> -Нитротолуол  | 1481        | —3,6                                 | [36]       | Тетрахлорэтилен              | 1053        | —2,9                                 | [36]       |
| <i>орто</i> -Нитротолуол  | 1473        | —3,7                                 | [41]       | Тетраэтиленгликоль           | 1586        | —3,0                                 | [42]       |
| Нонан                     | 1248        | —4,4                                 | [38]       | (25° С)                      |             |                                      |            |
| 1-Нонен                   | 1218        | —                                    | [45]       | Тиофен                       | 1300        | —4,2                                 | [38]       |
| Оксид мезитила            | 1310        | —                                    | [42]       | <i>мета</i> -Толуидин        | 1594        | —3,5                                 | [36]       |
| <i>н</i> -Октан           | 1192        | —4,2                                 | [39]       | <i>орто</i> -Толуидин        | 1618        | —3,9                                 | [36]       |
| <i>изо</i> -Октан         | 1111        | —                                    | [36]       | Толуол                       | 1328        | —4,3                                 | [39]       |
| 1-Октен                   | 1184        | —                                    | [45]       | 1-Тридецен                   | 1313        | —                                    | [45]       |
| Октил:                    |             |                                      |            | Триметиленбромид             | 1144        | —                                    | [37]       |
| бромистый                 | 1182        | —4,8                                 | [38]       | (23,5° С)                    |             |                                      |            |
| хлористый                 | 1280        | —4,2                                 | [38]       | Триолеин                     | 1482        | —                                    | [38]       |
| Паральдегид               | 1192        | —4,2                                 | [36]       | 1,2,4-Трихлорбензол          | 1301        | —                                    | [38]       |
| 1-Пентадецен              | 1351        | —                                    | [45]       | Трихлорэтилен                | 1049        | —4,4                                 | [38]       |
| Пентан                    | 1008        | —4,2                                 | [38]       | Триэтиленгликоль (25° С)     | 1608        | —3,8                                 | [42]       |
| Пентахлорэтан             | 1113        | —                                    | [38]       | Уксусный ангидрид            | 1384        | —                                    | [37]       |
| Перхлорэтилен             | 1066        | —                                    | [38]       | (24° С)                      |             |                                      |            |
| $\alpha$ -Пиколин (28° С) | 1453        | —                                    | [37]       | 1-Ундецен                    | 1275        | —                                    | [45]       |
| $\beta$ -Пиколин (28° С)  | 1419        | —                                    | [37]       | Фенилгидразин                | 1738        | —                                    | [38]       |
| Пинен (24° С)             | 1247        | —                                    | [37]       | Фенол (100° С)               | 1274        | —3,2                                 | [51]       |
| Пиперидин                 | 1400        | —                                    | [38]       | Формамид                     | 1550        | —                                    | [38]       |
| Пиридин                   | 1441        | —4,1                                 | [41]       | Хинальдин                    | 1575        | —                                    | [38]       |
| <i>н</i> -Пропилацетат    | 1198        | —4,8                                 | [36]       | Хинолин                      | 1600        | —4,8                                 | [38]       |
| <i>изо</i> -Пропилацетат  | 1133        | —4,4                                 | [36]       | Хлорбензол                   | 1289        | —3,7                                 | [39]       |
| Пропил:                   |             |                                      |            | $\alpha$ -Хлорнафталин       | 1481        | —                                    | [38]       |
| иодистый                  | 929         | —4,0                                 | [38]       | Хлороформ                    | 1005        | —3,6                                 | [38]       |
| хлористый                 | 1091        | —4,4                                 | [38]       | <i>мета</i> -Хлортолуол      | 1326        | —                                    | [38]       |
| Пропионитрил              | 1271        | —                                    | [38]       | <i>орто</i> -Хлортолуол      | 1344        | —                                    | [38]       |
| Псевдобутил-метаксилол    | 1354        | —                                    | [38]       | <i>н</i> -Хлортолуол         | 1316        | —                                    | [38]       |
| Псевдокумол               | 1368        | —                                    | [38]       | Циклогексан                  | 1277        | —4,6                                 | [36]       |
| Салициловый альдегид      | 1474        | —                                    | [39]       | Циклогексанол                | 1493        | —4,9                                 | [38]       |
| (27° С)                   |             |                                      |            | Циклогексанон                | 1449        | —5,4                                 | [38]       |
| Сероуглерод               | 1158        | —3,2                                 | [37]       | Циклогексен                  | 1305        | —5,4                                 | [38]       |
| Спирт:                    |             |                                      |            | Циклогексилламин             | 1435        | —                                    | [38]       |
| <i>н</i> -амиловый        | 1294        | —                                    | [38]       | Циклогексил хлористый        | 1319        | —4,8                                 | [38]       |
| <i>изо</i> -амиловый      | 1260        | —3,4                                 | [36]       | Циклопентадиен               | 1421        | —                                    | [38]       |
| <i>трет</i> -амиловый     | 1204        | —                                    | [37]       | Циклопентан (30° С)          | 1182        | —                                    | [36]       |
| бензиловый                | 1540        | —3,2                                 | [38]       | Циклопентанон (24° С)        | 1474        | —                                    | [37]       |
| <i>н</i> -бутиловый       | 1263        | —3,6                                 | [36]       | Цитраль                      | 1442        | —3,8                                 | [38]       |
| <i>изо</i> -бутиловый     | 1212        | —3,5                                 | [36]       | Четыреххлористый угле-       | 938         | —3,0                                 | [38]       |
| <i>н</i> -гексиловый      | 1322        | —3,5                                 | [36]       | род                          |             |                                      |            |
| <i>н</i> -гептиловый      | 1341        | —3,7                                 | [36]       | Этилацетат                   | 1177        | —4,5                                 | [36]       |
| <i>н</i> -декановый       | 1402        | —3,7                                 | [36]       | Этилбензиланилин             | 1586        | —                                    | [38]       |
| дециловый                 | 1413        | —4,4                                 | [47]       | Этилбензол                   | 1338        | —4,4                                 | [38]       |
| тетрадециловый            | 1404        | —                                    | [47]       | Этил:                        |             |                                      |            |
| (38,4° С)                 |             |                                      |            | бромистый                    | 900         | —3,4                                 | [41]       |
| додециловый (22,3° С)     | 1433        | —                                    | [47]       | иодистый                     | 876         | —2,7                                 | [41]       |
| метиловый                 | 1123        | —3,3                                 | [38]       | Этилбутират                  | 1197        | —4,1                                 | [36]       |
| <i>н</i> -нониловый       | 1391        | —4,3                                 | [38]       | Этилен:                      |             |                                      |            |
| <i>н</i> -октиловый       | 1358        | —3,6                                 | [36]       | бромистый                    | 1009        | —2,6                                 | [41]       |
| <i>н</i> -пропиловый      | 1223        | —3,7                                 | [36]       | хлористый                    | 1216        | —3,9                                 | [41]       |
| <i>изо</i> -пропиловый    | 1170        | —4,0                                 | [38]       | Этиленгликоль                | 1667        | —2,5                                 | [36]       |
| <i>н</i> -пентиловый      | 1294        | —3,5                                 | [36]       | Этилкаприлат (28° С)         | 1263        | —                                    | [37]       |
| $\gamma$ -фенилпропиловый | 1523        | —                                    | [50]       | Этиловый эфир:               |             |                                      |            |
| (30° С)                   |             |                                      |            | диэтиленгликоля              | 1458        | —                                    | [42]       |
| $\beta$ -фенилэтиловый    | 1512        | —                                    | [50]       | (25° С)                      |             |                                      |            |
| (30° С)                   |             |                                      |            | <i>орто</i> -крезола (25° С) | 1315        | —                                    | [37]       |
| фуриловый (25° С)         | 1450        | —3,5                                 | [42]       | фенола (26° С)               | 1153        | —                                    | [37]       |
| этиловый                  | 1165        | —3,4                                 | [36]       | хлоруксусной кисло-          | 1234        | —                                    | [37]       |
| Стирол                    | 1354        | —                                    | [36]       | ты (25,5° С)                 |             |                                      |            |
| Тетрабромэтан             | 1041        | —                                    | [39]       | Этилпропионат (23,5° С)      | 1185        | —                                    | [37]       |
| Тетралин                  | 1492        | —4,5                                 | [38]       | Этилфенолкетон               | 1498        | —                                    | [38]       |
| Тетранитрометан           | 1039        | —4,0                                 | [38]       | Этилформиат (24° С)          | 1121        | —                                    | [37]       |
| Тетрахлорэтан             | 1171        | —                                    | [38]       |                              |             |                                      |            |

Таблица 7.7. Скорость звука в маслах, нефти и нефтепродуктах [52]

| Вещество      | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ | Вещество                             | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ | $\Delta v/\Delta t, \text{м}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{с})$ |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|
| Масло:        |                     |                 | Авиамасло:                           |                     |                 |                                                                 |
| анисовое      | 28,5                | 1451            | МС-20                                | 20                  | 1506            | -3,9 [53]                                                       |
| арахисовое    | 31,5                | 1562            | компрессорное                        | 20                  | 1503            | -4,0 [53]                                                       |
| вербеновое    | 29                  | 1323            | КС-19                                |                     |                 |                                                                 |
| веретенное    | 32                  | 1342            | трансформаторное                     | 20                  | 1445            | -3,8 [53]                                                       |
| газолиновое   | 34                  | 1250            |                                      | 25                  | 1415            | — [48]                                                          |
| гераниевое    | 27                  | 1192            | Бензин А-66                          | 20                  | 1081            | -4,0 [53]                                                       |
| горчичное     | 31,5                | 1825            | Бензин А-72                          | 19,6                | 1158            | — [53]                                                          |
| иноновое      | 34                  | 1331            | Гудрон масляный                      | 20                  | 1512            | -3,7 [53]                                                       |
| кассиное      | 28,5                | 1460            | Дизельное топливо «Лет-<br>нее»      | 20                  | 1357            | -4,15 [53]                                                      |
| касторовое    | 21                  | 1500 [33]       | Дизельное топливо «Зим-<br>нее»      | 20                  | 1332            | -3,9 [53]                                                       |
| кедровое      | 29                  | 1406            | Керосин                              | 34                  | 1295            | —                                                               |
| кокосовое     | 31,5                | 1490            | Нефть отечественных<br>месторождений | —                   | 1335 ÷<br>1379  | -3,88 ÷ -4,09 [53]                                              |
| ксанторидзное | 29                  | 1394            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| кужжтное      | 32,5                | 1432            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| лавандовое    | 28,5                | 1310            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| лимонное      | 29                  | 1076            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| линаллооловое | 32                  | 1397            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| льняное       | 31,5                | 1772            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| оливковое     | 32,5                | 1381            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| парафиновое   | 33,5                | 1420            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| сосновое      | 31                  | 1468            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| спермадетовое | 33                  | 1210            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| сурепное      | 30,8                | 1450            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| терпентинное  | 27                  | 1280            |                                      |                     |                 |                                                                 |
| эвкалиптовое  | 29,5                | 1276            |                                      |                     |                 |                                                                 |

Таблица 7.8. Скорость звука в дистиллированной воде в зависимости от температуры при  $p_0 = 980 \text{ ГПа}$  [43]\*

| $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                     | 1400+           |                     | 1400+           |                     | 1500+           |                     | 1500+           |
| 0                   | 2,7             | 26                  | 99,6            | 51                  | 43,9            | 76                  | 55,4            |
| 1                   | 7,7             |                     | 1500+           | 52                  | 44,9            | 77                  | 55,3            |
| 2                   | 12,6            | 27                  | 2,2             | 53                  | 45,9            | 78                  | 55,2            |
| 3                   | 17,3            | 28                  | 4,7             | 54                  | 46,8            | 79                  | 55,0            |
| 4                   | 22,0            | 29                  | 7,1             | 55                  | 47,7            | 80                  | 54,8            |
| 5                   | 26,5            | 30                  | 9,4             | 56                  | 48,5            | 81                  | 54,6            |
| 6                   | 30,9            | 31                  | 11,7            | 57                  | 49,3            | 82                  | 54,3            |
| 7                   | 35,2            | 32                  | 13,9            | 58                  | 50,0            | 83                  | 54,0            |
| 8                   | 39,5            | 33                  | 16,1            | 59                  | 50,7            | 84                  | 53,6            |
| 9                   | 43,6            | 34                  | 18,1            | 60                  | 51,3            | 85                  | 53,2            |
| 10                  | 47,6            | 35                  | 20,1            | 61                  | 51,9            | 86                  | 52,8            |
| 11                  | 51,5            | 36                  | 22,1            | 62                  | 52,4            | 87                  | 52,4            |
| 12                  | 55,3            | 37                  | 23,9            | 63                  | 52,9            | 88                  | 51,9            |
| 13                  | 59,1            | 38                  | 25,7            | 64                  | 53,4            | 89                  | 51,3            |
| 14                  | 62,7            | 39                  | 27,5            | 65                  | 53,8            | 90                  | 50,8            |
| 15                  | 66,3            | 40                  | 29,2            | 66                  | 54,1            | 91                  | 50,2            |
| 16                  | 69,7            | 41                  | 30,8            | 67                  | 54,4            | 92                  | 49,6            |
| 17                  | 73,1            | 42                  | 32,4            | 68                  | 54,7            | 93                  | 48,9            |
| 18                  | 76,4            | 43                  | 33,9            | 69                  | 54,9            | 94                  | 48,2            |
| 19                  | 79,6            | 44                  | 35,3            | 70                  | 55,1            | 95                  | 47,5            |
| 20                  | 82,7            | 45                  | 36,7            | 71                  | 55,3            | 96                  | 46,8            |
| 21                  | 85,7            | 46                  | 38,1            | 72                  | 55,4            | 97                  | 46,0            |
| 22                  | 88,6            | 47                  | 39,3            | 73                  | 55,4            | 98                  | 45,1            |
| 23                  | 91,5            | 48                  | 40,6            | 74                  | 55,5            | 99                  | 44,3            |
| 24                  | 94,3            | 49                  | 41,7            | 75                  | 55,5            | 100                 | 43,4            |
| 25                  | 97,0            | 50                  | 42,9            |                     |                 |                     |                 |

\* Измерения проведены на частотах  $f = 0,75$  и  $3,5 \text{ МГц}$ . См. также [54].

Таблица 7.9. Скорость звука в расплавах

| Вещество         | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, \text{м/с}$ | $\Delta t$ | $-\Delta v/\Delta t, \text{м/(K} \cdot \text{с)}$ | Литература       |
|------------------|---------------------|-----------------|------------|---------------------------------------------------|------------------|
| Алюминий         | 660                 | 4673—4730       | —          | 0,16—0,47                                         | [55, 56]         |
| Бромистый калий  | 742                 | 1770            | 745—1010   | 0,67                                              | [57]             |
| Бромистый натрий | 745                 | 1798            | 750—1010   | 0,63                                              | [57]             |
| Висмут           | 280                 | 1649—1663       | 289—356    | 0—0,08                                            | [58, 59]         |
| Галлий           | 30                  | 2740—2872       | 30—275     | 0,23                                              | [60, 61]         |
| Индий            | 156                 | 2215—2315       | 156—950    | 0,27—0,5                                          | [60, 61]         |
| Иодистый калий   | 682                 | 1555            | 690—1020   | 0,64                                              | [57]             |
| Иодистый натрий  | 660                 | 1502            | 670—1030   | 0,54                                              | [57]             |
| Кадмий           | 321                 | 2200—2256       | 321—750    | 0,29—0,62                                         | [60—62]          |
| Калий            | 64                  | 1820—1880       | 64—160     | 0,5—0,53                                          | [60, 63, 64]     |
| Медь             | 1100                | 3460            | 1083—1500  | 0,46                                              | [61]             |
| Натрий           | 100                 | 2395—2653       | 98—700     | 0,3—0,66                                          | [60, 63, 64, 66] |
| Олово            | 232                 | 2270—2480       | 232—1000   | 0,21—0,7                                          | [60, 61, 67—69]  |
| Ртуть            | 20                  | 1450—1452       | 0—204      | 0,31—0,7                                          | [68, 70—72]      |
| Рубидий          | 39                  | 1260            | 39—160     | 0,4                                               | [60]             |
| Свинец           | 327                 | 1790—1820       | 327—1000   | 0,3—0,53                                          | [58, 60—62]      |
| Сера             | 115                 | 1315            | —          | —                                                 | [60]             |
| Серебро          | 970                 | 2710—2770       | 961—1540   | 0,41—0,47                                         | [61, 73]         |
| Сурьма           | 630                 | 1980            | 630—880    | 0                                                 | [73]             |
| Таллий           | 302                 | 1625            | —          | —                                                 | [60]             |
| Теллур           | 460                 | 920             | 460—950    | Изменяет знак                                     | [61]             |
| Хлористый калий  | 770                 | 2275            | 785—1020   | 0,88                                              | [57]             |
| Хлористый натрий | 800                 | 2483            | 810—1010   | 0,92                                              | [57]             |
| Цезий            | 29                  | 967             | 29—130     | 0,3                                               | [60]             |
| Цинк             | 420                 | 2700—2850       | 419—850    | 0,27—0,31                                         | [60, 61, 73, 74] |

Таблица 7.10. Скорость звука и ее анизотропия в жидких кристаллах

| Вещество                 | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, 10^3 \text{ м/с}$ | Литера-<br>тура | Вещество                                                                                        | $t, ^\circ\text{C}$ | $v, 10^3 \text{ м/с}$ |                               | Литера-<br>тура |
|--------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------|
|                          |                     |                       |                 |                                                                                                 |                     | $\theta = 0^\circ$    | $\theta = 90^\circ$           |                 |
| Холестериллино-<br>леат  | 30                  | 1,54                  | [82]            | Диэтил- <i>p-p</i> -азоксиди-<br>бензоат<br>Этил- <i>p</i> -метоксибензлн-<br>ден аминоциннамат | 117,4               | 1,275                 | 1,23                          | [84]            |
| Холестерилпропио-<br>нат | 50                  | 1,44                  |                 |                                                                                                 | 113,2               | 1,30                  | 1,255                         |                 |
|                          | 100                 | 1,268                 | [83]            |                                                                                                 | 88,2                | 1,65                  | 1,56                          | [85]            |
| Холестерилаурат          | 124                 | 1,204                 |                 |                                                                                                 |                     |                       | 1,475 ( $\theta = 45^\circ$ ) |                 |
|                          | 73                  | 1,384                 | [83]            |                                                                                                 |                     |                       |                               |                 |
|                          | 98,5                | 1,268                 |                 |                                                                                                 |                     |                       |                               |                 |

Примечание.  $\theta$  — угол между направлением распространения звука и осью спирали геликоида.

Таблица 7.11. Скорость фронта ударной волны в жидкостях [86]

| Вещество | $t, ^\circ\text{C}$ | Отношение плотности до фронта к плотности за фронтом волны | Скачок давления, $10^2 \text{ МПа}$ | Скорость фронта, м/с | Вещество                 | $t, ^\circ\text{C}$ | Отношение плотности до фронта к плотности за фронтом волны | Скачок давления, $10^2 \text{ МПа}$ | Скорость фронта, м/с |
|----------|---------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Вода     | 20                  | 0,716                                                      | 31,4                                | 3354                 | Метиловый спирт          | 15                  | 0,625                                                      | 46,0                                | 3950                 |
|          |                     | 0,658                                                      | 57,4                                | 4126                 | Четыреххлористый углерод | 22                  | 0,622                                                      | 72,9                                | 3510                 |
|          |                     | 0,620                                                      | 86,6                                | 4813                 | Глицерин                 | 18                  | 0,710                                                      | 75,6                                | 4580                 |
|          |                     | 0,622                                                      | 84,3                                | 4757                 | Ацетон                   | 30                  | 0,623                                                      | 45,7                                | 3970                 |
|          |                     | 0,577                                                      | 131                                 | 5604                 | Бензол                   | 16                  | 0,647                                                      | 51,6                                | 4100                 |
|          |                     | 0,488                                                      | 329                                 | 8070                 | Толуол                   | 15                  | 0,650                                                      | 51,5                                | 4120                 |
|          |                     | 0,456                                                      | 383                                 | 8450                 |                          |                     |                                                            |                                     |                      |
|          |                     | 0,444                                                      | 395                                 | 8490                 |                          |                     |                                                            |                                     |                      |
|          |                     | 0,450                                                      | 414                                 | 8740                 |                          |                     |                                                            |                                     |                      |

Таблица 7.12. Параметр  $n$  адиабатической квадратичной нелинейности жидкостей ( $t \sim 20^\circ\text{C}$ )

| Вещество                             | $n$      | Литература       | Вещество                      | $n$       | Литература   |
|--------------------------------------|----------|------------------|-------------------------------|-----------|--------------|
| Азот ( $-195^\circ\text{C}$ )        | 4,1—8,8  | [87, 89]         | Нонан                         | 11,35     | [96]         |
| Аргон ( $-187^\circ\text{C}$ )       | 6,01     | [89]             | Октан                         | 11,34     | [96]         |
| Ацетон                               | 9,6—10   | [90, 91]         | Олово ( $240^\circ\text{C}$ ) | 5,4       | [88]         |
| Амиллацетат                          | 6,1      | [87]             | Ртуть ( $30^\circ\text{C}$ )  | 8,8       | [88]         |
| Бензин А-70                          | 11,2     | [90, 91]         | Спирт:                        |           |              |
| Бензол                               | 9,4—10,5 | [91, 92]         | $n$ -бутиловый                | 9,6       | [90]         |
| Висмут ( $318^\circ\text{C}$ )       | 8,1      | [88]             | $n$ -гексилловый              | 10,7      | [90]         |
| Вода                                 | 6,06—7,6 | [90, 91, 93, 94] | $n$ -дециловый                | 9,6       | [90]         |
| Вода тяжелая                         | 5,52     | [95]             | метиловый                     | 8,6—9,7   | [87, 90, 91] |
| Водород ( $-259^\circ\text{C}$ )     | 6,59     | [89]             | $n$ -нониловый                | 10,0      | [90]         |
| Пароводород ( $-258^\circ\text{C}$ ) | 8,12     | [95]             | $n$ -октиловый                | 9,7       | [90]         |
| Гептан                               | 11,16    | [96]             | $n$ -пропиловый               | 9,9       | [90]         |
| Глицерин                             | 10,4     | [95]             | этиловый                      | 10,6—11,0 | [90, 91]     |
| Додекан                              | 11,41    | [96]             | Толуол                        | 10,4—11,2 | [90, 96]     |
| Дихлорэтан                           | 8,6—8,7  | [90, 91]         | Трансформаторное масло        | 7,5       | [90]         |
| Индий ( $160^\circ\text{C}$ )        | 5,5      | [88]             | Четыреххлористый углерод      | 11,4—11,8 | [90, 91]     |
| мета-Ксилол                          | 9,7—10,6 | [90, 93]         | Хлороформ                     | 11,5—11,6 | [90, 91]     |
| Метан ( $-163^\circ\text{C}$ )       | 18,95    | [89]             | Этилацетат                    | 6,0       | [87]         |
| Натрий ( $110^\circ\text{C}$ )       | 3,7      | [88]             | Эфир этиловый                 | 4,1       | [87]         |

Таблица 7.13. Зависимость нелинейного параметра  $n$  воды от температуры и давления [97]

| $t, ^\circ\text{C}$ | Давление, МПа  |      |      |      |      |      |
|---------------------|----------------|------|------|------|------|------|
|                     | 0,1            | 25   | 50   | 100  | 400  | 800  |
| 0                   | 5,08           | 5,90 | 6,58 | 7,35 | 7,60 | —    |
| 30                  | 6,21; 7,0 [90] | 6,43 | 6,63 | 6,83 | 7,19 | —    |
| 50                  | 6,55; 7,3 [90] | 6,62 | 6,69 | 6,80 | 6,97 | 6,68 |
| 80                  | 6,74; 7,7 [90] | 6,79 | 6,84 | 6,86 | 6,64 | 6,50 |
| 95                  | 8,1 [90]       | —    | —    | —    | —    | —    |

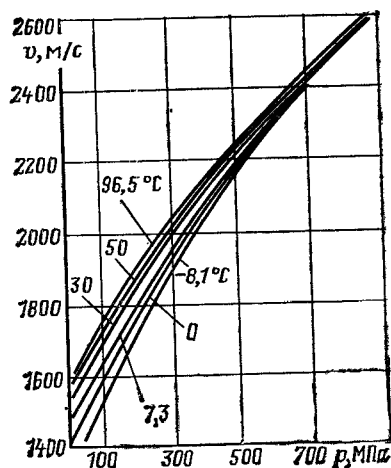


Рис. 7.13. Зависимость скорости звука в воде от давления при различной температуре [80]

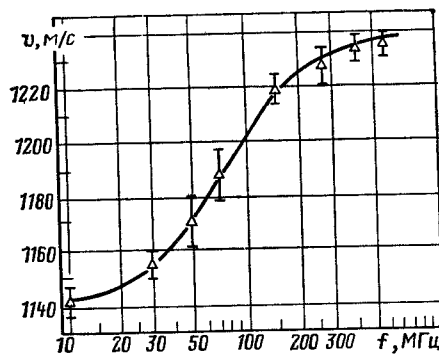


Рис. 7.14. Дисперсия скорости звука в сероуглероде при  $25^\circ\text{C}$  (колебательная релаксация C-S-связей) [81]

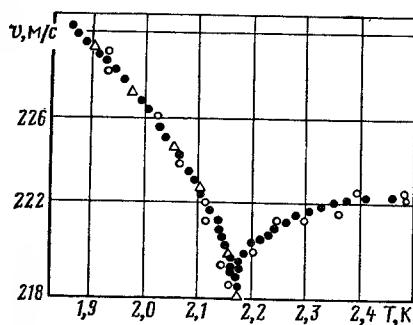


Рис. 7.15. Скорость звука в жидком гелии вблизи  $\lambda$ -точки (точки перехода He I в сверхтекучее состояние He II) [65]

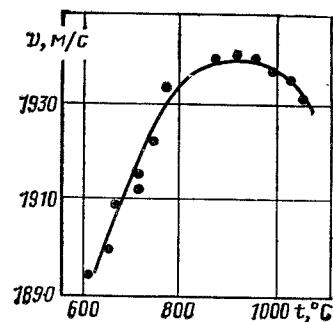


Рис. 7.16. Зависимость скорости звука от температуры в жидком висмуте [61]

Таблица 7.14. Коэффициент поглощения звука в жидкостях

| Вещество               | $t$ , °C | $f$ , МГц | $\alpha/f^2$ , $10^{-15}$ с <sup>2</sup> /м | Литература     |
|------------------------|----------|-----------|---------------------------------------------|----------------|
| Азот                   | —199,3   | 44,4      | 10,5                                        | [100]          |
| n-Амиллацетат          | 20       | 20—200    | 65                                          | [36]           |
| орто-Анизидин          | 24,8     | 104,3     | 58,8                                        | [101]          |
| Анизол                 | 24,8     | 104       | 43,8                                        | [101]          |
| Анисальдегид           | 24,6     | 104,1     | 63,6                                        | [101]          |
| Аннлин                 | 25       | 0,3—0,6   | 50                                          | [36]           |
| Аргон                  | —188     | 44,4      | 10,1                                        | [100]          |
| Ацеталь                | 25       | 100—200   | 57—43                                       | [36]           |
| Ацетил хлористый       | 24,6     | 104       | 82,8                                        | [36]           |
| Ацетон                 | 25       | 20—1900   | 31—28                                       | [36, 105]      |
|                        | 25       | 1—4       | 70                                          | [42]           |
| Ацетонитрил            | 25       | 7—10      | 80                                          | [36]           |
| Ацетофенон             | 25       | 15—20     | 50                                          | [36]           |
| Бензилацетон           | 25       | 10—200    | 58                                          | [36]           |
| Бензилметилкетон       | 25       | 10—200    | 53                                          | [36]           |
| Бензилхлорид           | 25       | 20—200    | 74                                          | [36]           |
| Бензол:                | 25       | 0,5—30    | 880—870                                     | [102]          |
|                        | 20       | 482       | 445                                         | [104]          |
|                        | 20       | 1200—1900 | 184—95                                      | [105]          |
| Бромистый              | 25       | 20—100    | 145                                         | [36]           |
|                        | 25       | 1000—1900 | 128—94                                      | [105]          |
| иодистый               | 25       | 20—260    | 210                                         | [104]          |
| Бензотрихлорид         | 25       | 100—200   | 107                                         | [36]           |
| n-Броманизол           | 25       | 100—200   | 62                                          | [36]           |
| орто-Броманизол        | 25       | 100—200   | 70                                          | [36]           |
| Бромоформ              | 25       | 0,2—200   | 250                                         | [36]           |
| Бутил:                 |          |           |                                             |                |
| бромистый              | 2        | 15        | 49                                          | [102]          |
| иодистый               | 2        | 15        | 48                                          | [102]          |
| хлористый              | 2        | 15        | 108                                         | [102]          |
| n-Бутилацетат          | 20       | 40—200    | 46                                          | [36]           |
| изо-Бутилацетат        | 25       | 20—200    | 55                                          | [36]           |
| Вода                   | 20       | 7—1900    | 25                                          | [36, 104, 105] |
|                        | 20       | 843       | 24,2                                        | [104]          |
| Водород                | —256,2   | 44,4      | 5,6                                         | [36]           |
| n-Гексан               | 25       | 20—200    | 60                                          | [36]           |
| n-Гептан               | 25       | 1—15      | 80                                          | [36]           |
| Гелий                  | —270,2   | 15        | 110                                         | [31]           |
| Глицерин               | —18,8    | 30        | 12 200                                      | [106]          |
|                        | 20—27    | 0,15—4    | 2500                                        | [42]           |
| Декагидронафталин      | 25       | 100—200   | 121                                         | [36]           |
| 1,2-Диброметан         | 25       | 30        | 311                                         | [107]          |
| 1,1-Диметилциклогексан | 24,1     | 104,1     | 127                                         | [101]          |
| 1,4-Дюксан             | 25       | 100—200   | 114                                         | [36]           |

| Вещество                   | $t$ , °C | $f$ , МГц | $\alpha/f^2$ , $10^{-15}$ с <sup>2</sup> /м | Литература |
|----------------------------|----------|-----------|---------------------------------------------|------------|
| <i>орто</i> -Дихлорбензол  | 24       | 100—200   | 131                                         | [36]       |
| 1,1-Дихлорэтан             | 25       | 30        | 100                                         | [36]       |
| 1,2-Дихлорэтан             | 30       | 0,7—1,2   | 105                                         | [102]      |
| <i>транс</i> -Дихлорэтилен | 25       | 30        | 360                                         | [36]       |
| Диэтиламин                 | 25       | 100—200   | 35                                          | [36]       |
| Диэтилкетон                | 25       | 10—200    | 25                                          | [36]       |
| Изопрен                    | 15       | 10—190    | 58                                          | [36]       |
| Инден                      | 25       | 100—200   | 133                                         | [36]       |
| Кислород                   | —213,2   | 44,4      | 8,6                                         | [36]       |
| Кислота:                   |          |           |                                             |            |
| дихлоруксусная             | 25       | 100—200   | 214—201                                     | [36]       |
| изовалериановая            | 25       | 100—200   | 170                                         | [36]       |
| муравьиная                 | 17,5     | 4         | 2270                                        | [108]      |
|                            | 20,5     | 9,8       | 1170                                        | [108]      |
| уксусная                   | 18       | 0,5       | 30 000                                      | [109]      |
|                            | 18       | 67,5      | 158                                         | [36]       |
|                            | 25       | 100—200   | 140                                         | [36]       |
|                            | 25       | 100—200   | 91                                          | [36]       |
| фурфурловая                | 24,8     | 104,2     | 96                                          | [101]      |
| Коричный альдегид          | 24,6     | 104,2     | 82,7                                        | [101]      |
| Крононовый альдегид        | 25       | 20—200    | 65                                          | [36]       |
| <i>орто</i> -Ксилол        | 25       | 1—20      | 60                                          | [36]       |
| <i>пара</i> -Ксилол        |          |           |                                             |            |
| Масло:                     |          |           |                                             |            |
| касторовое                 | 18,6     | 3,16      | 10 900                                      | [106]      |
|                            | 20       | 1,43      | 6000                                        | [110]      |
| льняное                    | 20,5     | 3,1       | 1470                                        | [110]      |
| оливковое                  | 21—25    | 1—4       | 1250                                        | [111]      |
| Мезитилоксид               | 24,4     | 104,1     | 35,7                                        | [101]      |
| Метилаль                   | 24,4     | 104,1     | 39,2                                        | [101]      |
| Метилацетат                | 25       | 1         | 468                                         | [111]      |
|                            | 24,4     | 104,2     | 36                                          | [101]      |
| Метилбензол                | 20       | 27—482    | 80                                          | [104]      |
| Метилбутират               | 24,5     | 104,1     | 35,3                                        | [101]      |
| Метилдисульфид             | 24,9     | 104       | 58,7                                        | [101]      |
| Метил:                     |          |           |                                             |            |
| бромистый                  | 2        | 15        | 300                                         | [36]       |
| иодистый                   | 25       | 15—200    | 310                                         | [36]       |
| Метилен:                   |          |           |                                             |            |
| бромистый                  | 2        | 15        | 304                                         | [36]       |
|                            | 25       | 30        | 560                                         | [36]       |
|                            | 25       | 1000—1900 | 104—40                                      | [105]      |
|                            | 25       | 1—4       | 816—820                                     | [36]       |
| иодистый                   | 25       | 30        | 250                                         | [36]       |
|                            | 25       | 21,6      | 920                                         | [104]      |
| хлористый                  | 20       | 482       | 171                                         | [104]      |
|                            | 20       | 104       | 57,5                                        | [101]      |
| Метилсалицилат             | 24,5     | 104,1     | 32                                          | [101]      |
| Метилформамид              | 24,6     | 5—25      | 50                                          | [36]       |
| Метилформат                | 25       | 100—200   | 95                                          | [36]       |
| Метилциклогексан           | 25       | 10—200    | 30                                          | [36]       |
| Метилэтилкетон             | 25       | 100—200   | 70                                          | [36]       |
| <i>орто</i> -Нитроанизол   | 25       | 0,3—200   | 73                                          | [36]       |
| Нитробензол                | 25       | 7—10      | 90                                          | [36]       |
| Нитрометан                 | 25       | 40—200    | 40                                          | [36]       |
| <i>n</i> -Пропилацетат     | 20       | 20—200    | 65                                          | [36]       |
| <i>изо</i> -Пропилацетат   | 25       | 2—200     | 64                                          | [36]       |
| <i>изо</i> -Пропилбензол   |          |           |                                             |            |
| Пропил:                    |          |           |                                             |            |
| бромистый                  | 2        | 15        | 39                                          | [103]      |
| иодистый                   | 2        | 15        | 54                                          | [103]      |
| хлористый                  | 2        | 15        | 42                                          | [103]      |
| $\beta$ -Пиколин           | 24,5     | 100—200   | 65                                          | [36]       |
| Пирндин                    | 0        | 0,25—1,0  | 334                                         | [114]      |
| Сероуглерод                | 20       | 1—10      | 6000                                        | [108]      |
|                            | 25,5     | 189,2     | 776                                         | [101]      |
|                            | 25       | 1000—1900 | 37—17                                       | [105]      |

| Вещество                 | $t, ^\circ\text{C}$ | $f, \text{ МГц}$ | $\alpha/f^2, 10^{-10} \text{ с}^2/\text{м}$ | Литература |
|--------------------------|---------------------|------------------|---------------------------------------------|------------|
| Спирт:                   |                     |                  |                                             |            |
| алиловый                 | 25                  | 100—200          | 45                                          | [36]       |
| <i>n</i> -амиловый       | 25                  | 21               | 102                                         | [36]       |
| изоамиловый              | 25                  | 100—200          | 131                                         | [36]       |
| бензиловый               | 25                  | 50—200           | 79                                          | [36]       |
| <i>n</i> -бутиловый      | 25                  | 4—200            | 81                                          | [36]       |
| изобутиловый             | 25                  | 100—200          | 140                                         | [36]       |
| метиловый                | 25                  | 7—250            | 33                                          | [36]       |
| <i>n</i> -пропиловый     | 25                  | 15—280           | 75                                          | [36]       |
| изопропиловый            | 23                  | 15               | 92                                          | [36]       |
| этиловый                 | 25                  | 8—220            | 53                                          | [36]       |
| фурфуриловый             | 25                  | 100—200          | 91                                          | [36]       |
| Толуол                   | 27                  | 0,15             | 205                                         | [113]      |
|                          | 25                  | 100—200          | 86                                          | [36]       |
|                          | 20                  | 1000—1900        | 81—66                                       | [105]      |
| Тиофен                   | 20                  | 301              | 775                                         | [104]      |
|                          | 20                  | 482              | 469                                         | [104]      |
|                          | 20                  | 843—1900         | 160—46                                      | [104, 105] |
| Толундин                 | 25                  | 27—482           | 50—60                                       | [107]      |
| Трибромэтан              | 25                  | 10—110           | 200                                         | [36]       |
| Трихлорэтан              | 30                  | 1,0              | 245                                         | [102]      |
|                          | 25                  | 10—110           | 130                                         | [36]       |
| Трихлорэтилен            | 25                  | 0,2—0,6          | 200                                         | [36]       |
| Тетрахлорэтилен          | 25                  | 0,2—0,4          | 304                                         | [36]       |
| Уксусный ангидрид        | 30                  | 0,7—1,2          | 445                                         | [102]      |
|                          | 24,6                | 104              | 58                                          | [101]      |
| Формамид                 | 25                  | 10—100           | 40                                          | [36]       |
| Фторбензол               | 25                  | 30               | 278                                         | [36]       |
|                          | 25                  | 1000—1900        | 221—140                                     | [105]      |
| <i>орто</i> -Хлоранилин  | 25                  | 100—200          | 54                                          | [36]       |
| Хлорбензол               | 25                  | 1—200            | 140                                         | [36]       |
|                          | 25                  | 1000—1900        | 125—96                                      | [105]      |
| Хлороформ                | 25                  | 0,2—200          | 418—380                                     | [36]       |
|                          | 20                  | 1000—1900        | 220—106                                     | [105]      |
| <i>орто</i> -Хлорфенол   | 25                  | 100—200          | 95                                          | [36]       |
| 2-Хлорэтанол             | 24,4                | 104,1            | 59                                          | [101]      |
| Циклогексан              | 30                  | 0,6—1,2          | 250                                         | [102]      |
|                          | 25                  | 100—200          | 101                                         | [36]       |
| Циклогексанон            | 25                  | 100—200          | 71                                          | [36]       |
| Циклогексен              | 25                  | 100—200          | 102                                         | [36]       |
| Циклогексиламин          | 25                  | 100—200          | 64                                          | [36]       |
| Четыреххлористый углерод | 30                  | 0,5—1,2          | 560                                         | [102]      |
|                          | 25                  | 3—200            | 540—517                                     | [36, 104]  |
|                          | 20                  | 482              | 480                                         | [104]      |
|                          | 20                  | 1000—1900        | 405—226                                     | [105]      |
| Эпихлоргидрин            | 24,4                | 104,1            | 68                                          | [101]      |
| Этаноламин               | 24,8                | 100—200          | 152                                         | [36]       |
| Этил:                    |                     |                  |                                             |            |
| бромистый                | 25                  | 1—200            | 70—62                                       | [36]       |
| иодистый                 | 2                   | 15               | 40                                          | [36]       |
| Этилацетат               | 30                  | 0,8—1,2          | 258                                         | [102]      |
|                          | 25                  | 1,0              | 500                                         | [36]       |
|                          | 20                  | 40—200           | 35                                          | [36]       |
| Этилбензол               | 25                  | 100—200          | 55                                          | [36]       |
| Этилбутират              | 24,4                | 104              | 39                                          | [101]      |
| Этилформиат              | 25                  | 20—100           | 50                                          | [36]       |
| Этилен:                  |                     |                  |                                             |            |
| бромистый                | 25                  | 0,2—200          | 300                                         | [36]       |
| хлористый                | 25                  | 1—30             | 140                                         | [36]       |
| Этиленгликоль            | 25                  | 5—15             | 120                                         | [36]       |
| Эфир:                    |                     |                  |                                             |            |
| изопропиловый            | 24                  | 104              | 53                                          | [36]       |
| этиловый                 | 25                  | 10—100           | 45                                          | [36]       |



Таблица 7.15. Коэффициент поглощения звука в расплавах металлов

| Вещество | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha/f^2, 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$ | Литература | Вещество | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha/f^2, 10^{-15} \text{ c}^2/\text{м}$ | Литература |
|----------|---------------------|---------------------------------------------|------------|----------|---------------------|---------------------------------------------|------------|
| Висмут   | 280                 | 8,05                                        | [74]       | Натрий   | 100                 | 11,5                                        | [72]       |
|          | 305                 | 9,3                                         | [72]       | Олово    | 240                 | 5,63                                        | [74]       |
| Галлий   | 30                  | 1,58                                        | [75]       | Ртуть    | 25                  | 5,7—6,2                                     | [72,75]    |
| Кадмий   | 360                 | 14,5                                        | [74]       | Свинец   | 340                 | 9,4                                         | [74]       |
| Калий    | 75                  | 29,9                                        | [72]       | Цинк     | 450                 | 3,7                                         | [74]       |

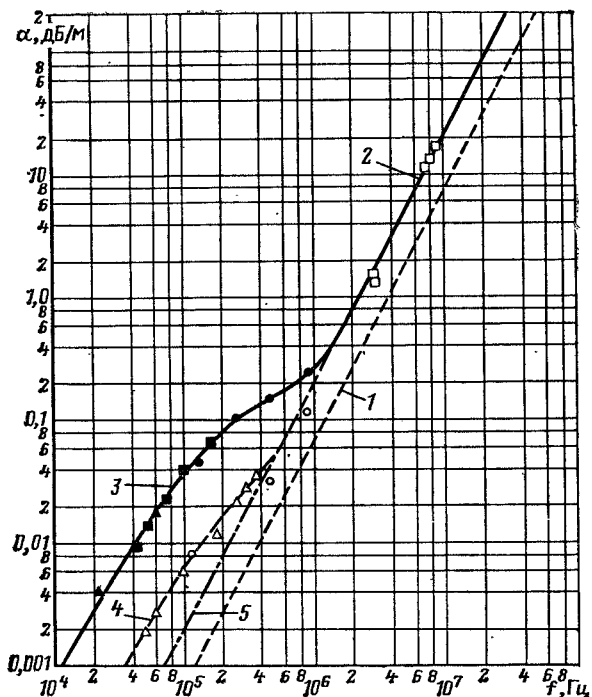


Рис. 7.17. Затухание звука в пресной и морской воде на высоких звуковых и ультразвуковых частотах:

1 — теория; 2 — эксперимент для морской и пресной воды; 3 — эксперимент для морской воды; 4 — эксперимент для пресной воды; 5 — экстраполяция данных для пресной воды [98]

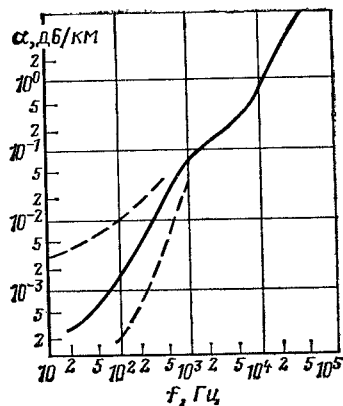


Рис. 7.18. Затухание звука в морской воде на низких частотах: сплошная линия — усредненные результаты измерений на длинных океанических трассах [99]; пунктир — область разброса экспериментальных данных

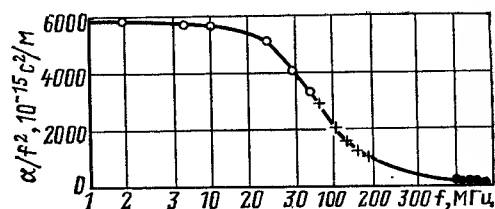


Рис. 7.19. Зависимость  $\alpha/f^2$  от частоты в сероуглероде при  $t=25^\circ\text{C}$  (колебательная релаксация C-S-связей) [115]:

○ — данные [105]

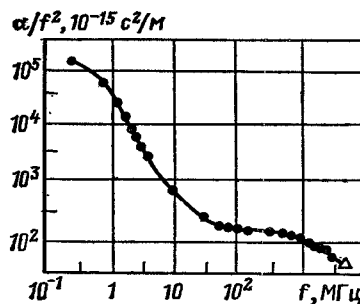


Рис. 7.20. Частотная зависимость  $\alpha/f^2$  в уксусной кислоте при  $t=20\div 25^\circ\text{C}$  [116]:  
△ — данные [117], полученные по тонкой структуре рассеяния света

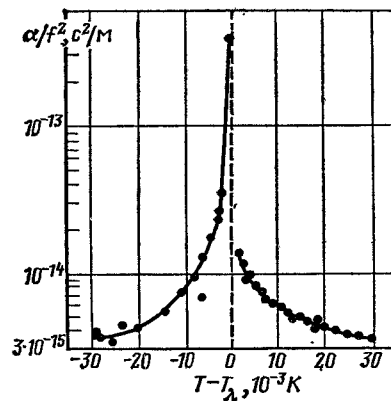


Рис. 7.21. Зависимость  $\alpha/f^2$  вблизи  $\lambda$ -точки в гелии ( $f=1\div 12,1 \text{ МГц}$ ) [119]

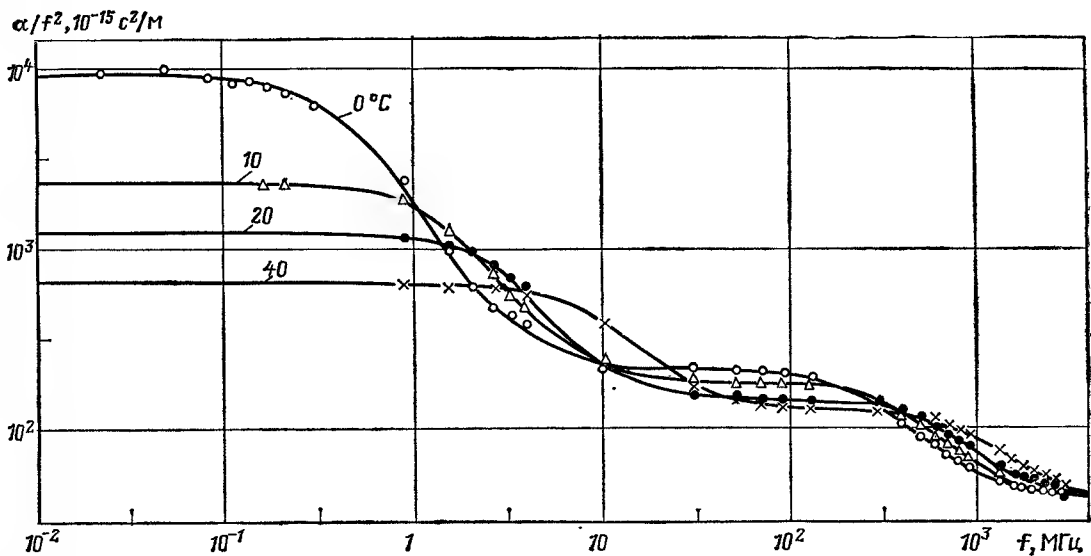


Рис. 7.22. Зависимость  $\alpha/f^2$  от частоты (две области релаксации) в капроновой кислоте при разной температуре [118]

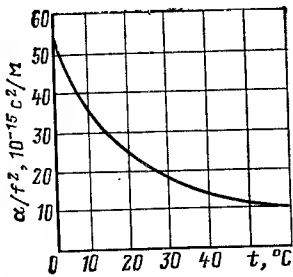


Рис. 7.23. Зависимость  $\alpha/f^2$  в воде от температуры ( $f=0,1 \div 100$  МГц) [54, 120]

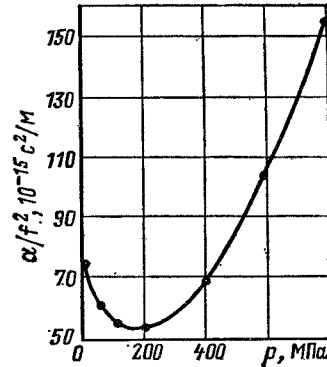


Рис. 7.25. Зависимость  $\alpha/f^2$  для н-бутилового спирта от давления [79]

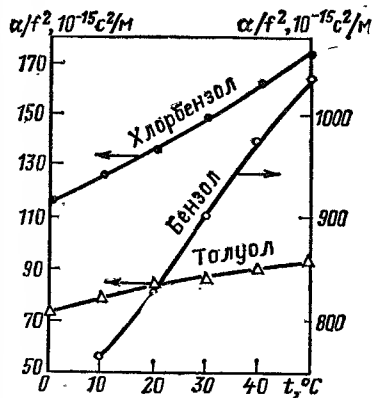
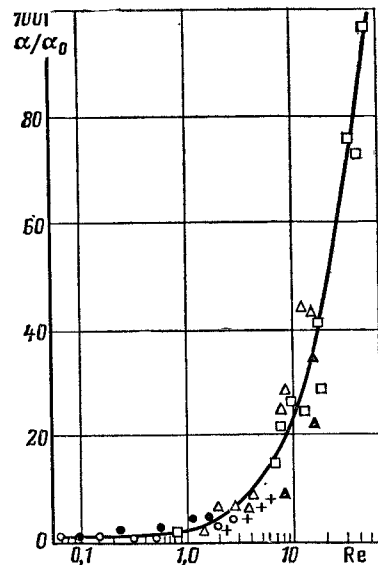


Рис. 7.24. Зависимость  $\alpha/f^2$  от температуры для хлорбензола ( $f=15 \div 30$  МГц), толуола ( $f=12 \div 16$  МГц) и бензола ( $f=6 \div 12$  МГц) [121]

Рис. 7.26. Нелинейное затухание в воде — зависимость коэффициента поглощения от амплитуды волны  $p'$  ( $Re=p'/2\pi b f$ ,  $b=\rho_0 v^3 \alpha / \pi^2 f^2$ ):

● — [122]; ○ — [123]; ▲ — [124]; △ — [125]; + — [126]; □ — [127]



**7.4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ  
ТЕЛАХ (табл. 7.16—7.26, рнс. 7.27—7.51)**

**Таблица 7.16. Скорость звука и удельное волновое сопротивление поликристаллических  
и аморфных твердых тел ( $t = 20^\circ \text{C}$ )**

| Вещество                                   | Скорость звука, $10^8 \text{ м/с}$ |                  |                     | Волновое сопротивление,<br>$10^8 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ |       | Литература |
|--------------------------------------------|------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|------------|
|                                            | в стержне<br>$v_{\text{ст}}$       | продольная $v_l$ | поперечная<br>$v_s$ | $z_l$                                                             | $z_s$ |            |
| Алюминий                                   | 5,08                               | 6,26             | 3,08                | 169                                                               | 83,2  | [4]        |
| (372° С)                                   | 4,34                               | —                | —                   | —                                                                 | —     | [129]      |
| Бериллий (27° С)                           | —                                  | 12,55            | 8,83                | 232                                                               | 162   | [130]      |
| Висмут                                     | 1,79                               | 2,18             | 1,10                | 214                                                               | 108   | [4]        |
| Вольфрам                                   | 4,31                               | 5,46             | 2,62                | 1042                                                              | 500   | [4]        |
| Железо                                     | 5,17                               | 5,85             | 3,23                | 456                                                               | 252   | [4]        |
| Золото                                     | 2,03                               | 3,24             | 1,20                | 626                                                               | 232   | [4]        |
| Индий                                      | —                                  | 2,56             | 0,81                | 187                                                               | 59    | [131]      |
| Иридий                                     | 4,79                               | —                | —                   | —                                                                 | —     | [4]        |
| Кадмий                                     | 2,40                               | 2,78             | 1,50                | 240                                                               | 129   | [4]        |
| Константан                                 | 4,30                               | 5,24             | 2,64                | 460                                                               | 232   | [4]        |
| Латунь                                     | 3,49                               | 4,43             | 2,12                | 361                                                               | 172   | [4]        |
| Магний                                     | 4,90                               | 5,78             | —                   | 101                                                               | —     | [132]      |
| Манганин                                   | 3,83                               | 4,66             | 2,35                | 393                                                               | 197   | [4]        |
| Марганец                                   | 3,83                               | 4,66             | —                   | 346                                                               | —     | [132]      |
| Медь                                       | 3,71                               | 4,70             | 2,26                | 418                                                               | 201   | [4]        |
| Молибден                                   | —                                  | 5,67             | 3,51                | 511                                                               | 316   | [133]      |
| Нейзильбер                                 | 3,58                               | 4,76             | 2,16                | 400                                                               | 181   | [4]        |
| Никель                                     | 4,79                               | 5,63             | 2,96                | 495                                                               | 260   | [4]        |
| Олово                                      | 2,73                               | 3,32             | 1,67                | 242                                                               | 122   | [4]        |
| Оргстекло                                  | —                                  | 2,67             | 1,12                | 30                                                                | 13    | [4]        |
| Платина                                    | 2,80                               | 3,96             | 1,67                | 846                                                               | 357   | [4]        |
| Свинец                                     | 1,20                               | 2,16             | 0,70                | 246                                                               | 80    | [4]        |
| Серебро                                    | 2,64                               | 3,60             | 1,59                | 380                                                               | 167   | [4]        |
| Сталь (различные марки)                    | 5,0—5,2                            | 5,68—6,10        | —                   | 445—477                                                           | —     | [53, 134]  |
| Сурьма                                     | 3,40                               | —                | —                   | —                                                                 | —     | [132]      |
| Тантал                                     | 3,35                               | —                | —                   | —                                                                 | —     | [132]      |
| Титан                                      | 5,04                               | 6,33             | 3,11                | 285                                                               | 139   | [133]      |
| Хром                                       | —                                  | 4,2              | —                   | 300                                                               | —     | [135]      |
| Цинк                                       | 3,81                               | 4,17             | 2,41                | 296                                                               | 171   | [4]        |
| Чугун                                      | 3,85                               | 4,50             | 2,40                | 350                                                               | 187   | [136]      |
| Стекло:                                    |                                    |                  |                     |                                                                   |       |            |
| плавленый кварц                            | —                                  | 5,935            | 3,740               | 132                                                               | 83    | [137]      |
| боратное (17° С)                           | —                                  | 3,47             | 1,25                | 62                                                                | 23    | [48]       |
| германатное (17° С)                        | —                                  | 3,61             | 2,21                | 130                                                               | 80    | [48]       |
| халькогенидное ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) | —                                  | 2,58             | 1,49                | 85                                                                | 50    | [48]       |
| ( $\text{As}_2\text{Se}_3$ ) (17° С)       | —                                  | 2,23             | 1,29                | 103                                                               | 100   | [48]       |
| стеклообразный селен                       | —                                  | 1,84             | 0,96                | 79                                                                | 41    | [48]       |
| фтористый бериллий (17° С)                 | —                                  | 4,70             | 3,90                | 221                                                               | 183   | [48]       |
| кронглас                                   | 5,30                               | 5,66             | 3,42                | 141                                                               | 86    | [4]        |
| тяжелый кронглас                           | 4,71                               | 5,26             | 2,96                | —                                                                 | —     | [4]        |
| флинтглас                                  | —                                  | 4,26             | 2,56                | 154                                                               | 92    | [4]        |
| легкий флинтглас                           | 4,55                               | 4,80             | 2,95                | —                                                                 | —     | [4]        |
| тяжелый флинтглас                          | 3,49                               | 3,76             | 2,22                | 173                                                               | 102   | [4]        |
| Винипласт                                  | —                                  | 2,30             | —                   | —                                                                 | —     | [53]       |
| Найлон                                     | —                                  | 2,65             | —                   | —                                                                 | —     | [138]      |
| Полистирол                                 | —                                  | 2,35             | 1,12                | —                                                                 | —     | [4]        |
| Полиэтилен                                 | —                                  | 2,48             | —                   | —                                                                 | —     | [138]      |
| Фторопласт                                 | —                                  | 1,34             | —                   | —                                                                 | —     | [138]      |
| Эпоксидная смола ЭД-5                      | —                                  | 2,58             | 1,22                | 29                                                                | 13    | [53]       |
| Каучук                                     | —                                  | 1,48             | —                   | 13                                                                | —     | [4]        |
| Эбонит                                     | 1,57                               | 2,40             | —                   | 28                                                                | —     | [4]        |
| Пробка                                     | 0,50                               | —                | —                   | —                                                                 | —     | [4]        |
| Фарфор                                     | 4,88                               | 5,34             | 3,12                | 128                                                               | 75    | [4]        |
| Парафин                                    | 1,46                               | —                | —                   | —                                                                 | —     | [136]      |
| Лед (0° С)                                 | 3,28                               | 3,98             | 1,99                | 37                                                                | 19    | [4]        |

| Вещество                       | Скорость звука, $10^3$ м/с |                                                 |                     | Волновое сопротивление<br>$10^8$ кг/(м <sup>2</sup> · с) |       | Литература |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|-------|------------|
|                                | в стержне<br>$v_{ст}$      | продольная<br>$v_l$                             | поперечная<br>$v_s$ | $z_l$                                                    | $z_s$ |            |
| Гипс                           | —                          | 4,79                                            | 2,37                | 111                                                      | 55    | [48]       |
| Гранит                         | 3,95                       | 4,45—5,57                                       | 2,78                | 165—206                                                  | 103   | [53, 132]  |
| Мрамор                         | 3,81                       | 4,95—6,15                                       | 3,26                | 137—166                                                  | 88    | [132, 139] |
| Сланец                         | 4,51                       | —                                               | —                   | —                                                        | —     | [132]      |
| Дерево (дуб)                   | 4,05                       | —                                               | —                   | —                                                        | —     | [136]      |
| Базальт                        | —                          | 5,40—6,15                                       | 3,14—3,26           | 145—166                                                  | 85—88 | [139]      |
| Известняк                      | —                          | 4,64—6,13                                       | 2,39—3,2            | 125—165                                                  | 64—86 | [139]      |
| Антрацит*                      | —                          | $v_{  } = 2,52; v_{\perp} = 2,15$               | —                   | $z_{  } = 40; z_{\perp} = 34$                            | —     | [140]      |
| Уголь газовый (Донбасс)*       | —                          | $v_{  } = 1,78 \div 2,0;$<br>$v_{\perp} = 1,23$ | —                   | $z_{  } = 23 \div 26;$<br>$z_{\perp} = 16$               | —     | [140]      |
| Уголь коксовый (Дон-<br>басс)* | —                          | $v_{  } = 1,54;$<br>$v_{\perp} = 1,50$          | —                   | $z_{  } \approx z_{\perp} = 23$                          | —     | [140]      |

\*  $v_{||}$  — скорость параллельно слоистости;  $v_{\perp}$  — перпендикулярно слоистости.

Таблица 7.17. Скорость звука в кубических кристаллах ( $t = 20 \div 25^\circ \text{C}$ )

| Кристалл             | Плотность,<br>$10^3$ , кг/м <sup>3</sup> | $v$ , $10^3$ м/с |           |           |                 |           |           | Литература      |
|----------------------|------------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|-----------------|
|                      |                                          | $L_{100}$        | $S_{100}$ | $L_{110}$ | $S_{110}^{110}$ | $L_{111}$ | $S_{111}$ |                 |
| Алмаз                | 3,51                                     | 17,5             | 12,8      | 18,3      | 11,6            | 18,6      | 12,0      | [48, 141]       |
| Алюминий             | 2,70                                     | 6,284            | 3,26      | 6,47      | 2,86            | 6,473     | 3,00      | [48, 141, 146]  |
| Антимонид:           |                                          |                  |           |           |                 |           |           |                 |
| галлия               | 5,62                                     | 3,96             | 2,77      | 4,38      | 2,07            | 4,51      | 2,33      | [48, 141]       |
| индия                | 5,79                                     | 3,42             | 2,26      | 3,77      | 1,63            | 3,89      | 1,87      | [142, 160]      |
| Арсенид:             |                                          |                  |           |           |                 |           |           |                 |
| галлия               | 5,31                                     | 4,71             | 3,34      | 5,24      | 2,47            | 5,40      | 2,79      | [48, 160]       |
| индия                | 5,66                                     | 3,84             | 2,64      | 4,29      | 1,83            | 4,42      | 2,14      | [141, 160]      |
| Бромат натрия        | 3,34                                     | 4,08             | 2,13      | 3,93      | 2,41            | 3,87      | 2,32      | [48]            |
| Бромистый:           |                                          |                  |           |           |                 |           |           |                 |
| аммоний              | 2,44                                     | 3,72             | 1,68      | 3,41      | 2,25            | 3,30      | 2,08      | [48]            |
| калий                | 2,75                                     | 3,55             | 1,36      | 3,02      | 2,29            | 2,84      | 2,19      | [141]           |
| натрий               | 3,20                                     | 3,48             | 1,74      | 3,26      | 2,13            | 3,18      | 2,01      | [141]           |
| серебро              | 6,48                                     | 2,95             | 1,05      | 2,83      | 1,34            | 2,79      | 1,25      | [141]           |
| таллий               | 7,45                                     | 2,40             | 1,14      | 2,12      | 1,28            | 2,07      | 1,16      | [149]           |
| цезий                | 4,46                                     | 2,636            | 1,30      | 2,47      | 1,299           | 2,41      | 1,50      | [48, 141, 148]  |
| Ванадий              | 6,02                                     | 6,15             | 2,66      | 5,99      | 3,011           | 5,93      | 2,90      | [48, 141]       |
| Ванадосульфат таллия | 6,22                                     | 2,81             | 0,873     | 2,46      | 1,6             | —         | —         | [169]           |
| Вольфрам             | 19,2                                     | 5,11             | 2,81      | 5,11      | 2,81            | 5,11      | 2,81      | [141]           |
| Галениит             | 7,5                                      | 4,11             | 1,82      | 3,71      | 2,55            | 3,56      | 2,33      | [48]            |
|                      |                                          | 3,69             |           | 3,56      | 2,07            | 3,52      | 1,99      | [141]           |
| Германат висмута     | 9,23                                     | 3,65             | 1,68      | 3,39      | 1,67            | 3,36      | —         | [156—159]       |
|                      |                                          |                  |           |           | 2,38            |           |           |                 |
| Германий             | 5,33                                     | 4,92             | 3,55      | 5,41      | 2,75            | 5,56      | 3,04      | [141]           |
| Грапат:              |                                          |                  |           |           |                 |           |           |                 |
| алюмоиттриевый       | 12,0                                     | 8,5630           | 5,0293    | 8,6016    | 4,9496          | 8,60      | —         | [135, 161, 162] |
|                      |                                          |                  | 5,0311    | 8,6167    |                 |           |           |                 |
| железоиттриевый      | 5,18                                     | 7,0800           | 4,0601    | 7,172     | 3,902           | —         | —         | [162—164]       |
|                      |                                          |                  | 3,843     |           |                 |           |           |                 |
| галлиево-иттриевый   | 5,79                                     | 7,08             | 4,06      | —         | —               | —         | —         | [135]           |
| $\alpha$ -Железо     | 7,86                                     | 5,55             | 3,77      | 6,24      | 2,46            | 6,46      | 2,97      | [48]            |
| Золото               | 19,3                                     | 3,10             | 1,47      | 3,33      | 0,866           | 3,39      | 1,10      | [141]           |
| Иодистый:            |                                          |                  |           |           |                 |           |           |                 |
| калий                | 3,13                                     | 2,92             | 1,16      | 2,51      | 1,89            | 2,33      | 1,68      | [141]           |
| натрий               | 3,67                                     | 2,667            | 1,304     | 2,374     | —               | —         | —         |                 |
|                      |                                          | 2,83             | 1,42      | 2,66      | 1,73            | 2,60      | 1,62      | [48, 166]       |
| цезий                | 4,51                                     | 2,326            | 1,17      | 2,21      | 1,39            | 2,16      | 1,32      | [48]            |

| Кристалл                     | Плотность,<br>10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup> | v, 10 <sup>3</sup> м/с            |                  |                  |                                 |                  |                  | Литература |
|------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------|
|                              |                                                   | L <sub>100</sub>                  | S <sub>100</sub> | L <sub>110</sub> | S <sub>110</sub> <sup>110</sup> | L <sub>111</sub> | S <sub>111</sub> |            |
| Калий (—190° С)              | 0,91                                              | 2,24                              | 1,70             | 2,73             | 0,68                            | 2,88             | 1,13             | [141]      |
| Кремний:                     | 2,33                                              | 8,43                              | 5,84             | 9,13             | 4,67                            | 9,35             | 5,09             | [143]      |
| KRS-5                        | 7,37                                              | $v_L = 2,078^*$ ; $v_s = 0,874^*$ |                  |                  |                                 |                  |                  | [167]      |
| KRS-6                        | 7,19                                              | 2,416                             | —                | 2,2170           | 1,0278                          | —                | —                | [167]      |
| Литий (—195° С)              | 0,55                                              | 5,19                              | 4,43             | 6,67             | 1,41                            | 7,09             | 2,82             | [141]      |
| Литий — индий                | 5,16                                              | 3,29                              | 2,27             | 3,82             | 1,17                            | 3,76             | 1,62             | [48]       |
| Медь                         | 8,94                                              | 4,34                              | 2,90             | 4,96             | 1,62                            | 5,16             | 2,14             | [141]      |
| Молибден                     | 10,19                                             | 6,72                              | 3,29             | 6,48             | 3,73                            | 8,19             | 2,39             | [141]      |
| Натрий (—183° С)             | 1,01                                              | 2,44                              | 2,41             | 3,31             | 0,84                            | 3,58             | 1,55             | [141]      |
| Никель                       | 8,90                                              | 5,26                              | 3,74             | 6,01             | 2,36                            | 6,24             | 2,90             | [141]      |
| Оксид:                       |                                                   |                                   |                  |                  |                                 |                  |                  |            |
| бария                        | 5,72                                              | 4,6921                            | 2,4422           | 4,5326           | 2,60                            | 4,61             | 2,57             | [48]       |
| магния                       | 3,58                                              | 8,94                              | 6,43             | 9,66             | 5,27                            | 9,89             | 5,68             | [141]      |
| Палладий                     | 12,13                                             | 4,28                              | 2,43             | 4,73             | 1,42                            | 5,06             | 1,86             | [48]       |
| Свинец                       | 11,34                                             | 2,03                              | 1,13             | 2,25             | 0,57                            | 2,32             | 0,80             | [141]      |
| Селенит цинка                | 5,42                                              | 4,07                              | 2,73             | 4,55             | 1,82                            | 4,75             | 2,19             | [48, 152]  |
| Серебро                      | 10,49                                             | 3,41                              | 2,07             | 3,79             | 1,20                            | 3,92             | 1,55             | [141]      |
| Силикат висмута              | 9,21                                              | 3,83                              | —                | —                | —                               | —                | —                | [168]      |
| Силикатное железо            | 7,19                                              | 5,68                              | 4,33             | 6,76             | 2,30                            | 7,09             | 3,13             | [48]       |
| Стронций азотнокислый        | 2,99                                              | 3,98                              | 2,21             | 4,05             | 2,07                            | 3,79             | 2,12             | [48]       |
| β-Сульфид цинка              | 4,10                                              | 4,90                              | 3,31             | 5,5              | 2,09                            | 5,74             | 2,56             | [48]       |
| Теллурид:                    |                                                   |                                   |                  |                  |                                 |                  |                  |            |
| ртути                        | 8,08                                              | 2,58                              | 1,62             | 2,87             | 1,03                            | 2,96             | 1,26             | [48]       |
| кадмия                       | 5,85                                              | 3,02                              | 1,87             | 3,34             | 1,20                            | 3,44             | 1,46             | [48]       |
| Титанат стронция             | 5,12                                              | 7,876                             | 4,910            | 8,098            | 4,918                           | 8,141            | 4,703            | [48]       |
| Торий                        | 11,66                                             | 2,54                              | 2,02             | 3,07             | 1,06                            | 3,22             | 1,45             | [141]      |
| Феррит кобальтоцинко-<br>вый | 5,43                                              | 7,00                              | 3,80             | 7,28             | 3,23                            | 7,37             | 3,42             | [48]       |
| Флюорит (плавиковый<br>шпат) | 3,18                                              | 7,19                              | 3,30             | 6,68             | 4,24                            | 6,50             | 3,95             | [141]      |
| Фосфид галлия                | 4,13                                              | —                                 | 4,13             | 6,32             | —                               | —                | —                | [150]      |
| Фтористый:                   |                                                   |                                   |                  |                  |                                 |                  |                  |            |
| барий                        | 4,89                                              | 4,3                               | 2,2              | 4,3              | 2,3                             | 4,3              | 2,3              | [153]      |
| литий                        | 2,64                                              | 6,63                              | 4,90             | 7,40             | 3,54                            | 7,60             | 4,16             | [141, 144] |
| магний                       | 3,98                                              | 6,64                              | 3,72             | —                | 4,16                            | —                | —                | [48, 135]  |
| натрий                       | 2,79                                              | —                                 | —                | $v_L = 5,66^*$   | $v_s = 3,33^*$                  | —                | —                | [165]      |
| Хлорат натрия                | 2,49                                              | 4,47                              | 2,17             | 4,18             | 2,68                            | 4,09             | 2,52             | [141]      |
| Хлористый:                   |                                                   |                                   |                  |                  |                                 |                  |                  |            |
| калий                        | 1,99                                              | 4,52                              | 1,77             | 3,89             | 2,9                             | 3,61             | 2,59             | [141, 144] |
| натрий                       | 2,17                                              | 4,79                              | 2,44             | 4,50             | 2,92                            | 4,45             | 2,78             | [144, 145] |
| серебро                      | 5,57                                              | 3,29                              | 1,06             | 3,13             | 1,47                            | 3,07             | 1,35             | [141]      |
| цезий                        | 3,99                                              | 3,04                              | 1,42             | 2,78             | 1,85                            | 2,69             | 1,71             | [48, 148]  |

\* Направление распространения волны не указано.

Таблица 7.18. Скорость звука в гексагональных кристаллах ( $t \approx 20^\circ \text{C}$ )

| Кристалл                | $\rho$ ,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup> | v, 10 <sup>3</sup> м/с |                  |                                         |                                 |                                                                                                               | Литература |
|-------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                         |                                               | L <sub>100</sub>       | L <sub>001</sub> | S <sub>произв</sub><br>S <sub>001</sub> | S <sub>100</sub> <sup>001</sup> | Другие кристаллографиче-<br>ские направления                                                                  |            |
| Бериллий                | 1,87                                          | 12,25                  | 13,41            | 9,11                                    | 9,10                            | 12,7 (L <sub>011</sub> ); 9,04 (S <sub>100</sub> <sup>010</sup> )                                             | [48, 141]  |
| Ванадат-германат свинца | 7,15                                          | —                      | 3,45             | 1,54                                    | —                               | 3,11 (L <sub>010</sub> ), 1,66 (S <sub>010</sub> <sup>100</sup> ),<br>1,49 (S <sub>010</sub> <sup>001</sup> ) | [48, 170]  |
| Ванадат-силикат свинца  | 7,02                                          | —                      | 3,62             | 1,73                                    | —                               | —                                                                                                             | [48]       |
| Иодат лития             | 4,5                                           | 4,13                   | 4,3              | 1,99                                    | —                               | —                                                                                                             | [48, 171]  |
| Иттрий                  | 4,48                                          | —                      | 4,14             | 2,33                                    | —                               | —                                                                                                             | [48]       |

| Кристалл                                | $10^8 \rho, \text{ кг/м}^3$ | $v, 10^3 \text{ м/с}$ |           |                           |                 |                                                            | Литература |
|-----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|---------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------|------------|
|                                         |                             | $L_{100}$             | $L_{001}$ | $S_{001}^{\text{пронзв}}$ | $S_{100}^{001}$ | Другие кристаллографические направления                    |            |
| Кадмий                                  | 8,64                        | 3,56<br>3,74          | 3,74<br>— | 1,46<br>1,34              | 1,46<br>1,34    | 2,44; 2,33 ( $L_{011}$ )<br>2,01; 2,05 ( $S_{100}^{010}$ ) | [48, 141]  |
| Канкринит                               | 2,42—<br>2,48               | —                     | 5,81      | 3,12                      | —               |                                                            | [48]       |
| $\beta$ -Кварц ( $580^\circ \text{C}$ ) | 2,53                        | —                     | 6,61      | 3,78                      | —               |                                                            | [48]       |
| Кобальт                                 | 8,79                        | 5,91                  | —         | 2,93                      | 2,93            | 6,38 ( $L_{011}$ ); 2,84 ( $S_{100}^{010}$ )               | [141]      |
| Лед ( $-16^\circ \text{C}$ )            | 0,94                        | 3,83                  | —         | 1,84                      | 1,84            | 3,99 ( $L_{001}$ ); 1,90 ( $S_{100}^{010}$ )               | [141]      |
| Магний                                  | 1,79                        | 5,84                  | —         | 3,06                      | 3,06            | 5,94 ( $L_{011}$ ); 3,09 ( $S_{100}^{010}$ )               | [141]      |
| Оксид цинка                             | 5,64                        | 6,0776                | 6,0961    | 2,7353                    | 2,7350          |                                                            | [172]      |
| Ортоселеноарсенит тал-<br>дия           | 7,83                        | —                     | 2,10      | 1,21                      | —               |                                                            | [169]      |
| Рений                                   | 20,53                       | —                     | 5,92      | 2,87                      | —               |                                                            | [48]       |
| Рутений                                 | 12,1                        | —                     | 7,28      | 3,95                      | —               |                                                            | [48]       |
| Селенид кадмия                          | 5,68                        | 3,630                 | 3,856     | 1,521                     | 1,592           |                                                            | [173]      |
| Сульфид:                                |                             |                       |           |                           |                 |                                                            |            |
| кадмия                                  | 4,82                        | 4,181                 | 4,414     | 1,757                     | 1,7565          |                                                            | [151, 174] |
| цинка                                   | 4,1                         | 5,512                 | 5,582     | 2,647                     | 2,652           |                                                            | [173]      |
| Титанат бария                           | 5,5                         | —                     | 5,50      | 2,79                      | —               |                                                            | [48]       |
| Цинк                                    | 7,18                        | 4,73                  | —         | 2,31                      | 2,31            | 2,92 ( $L_{011}$ ); 2,97 ( $S_{100}^{010}$ )               | [141]      |

Таблица 7.19. Скорость звука в тетрагональных кристаллах ( $t \approx 20^\circ \text{C}$ )

| Кристалл                                                                                                 | $10^8 \rho, \text{ кг/м}^3$ | $v, 10^3 \text{ м/с}$ |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | Литература         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
|                                                                                                          |                             | $L_{100}$             | $L_{010}$       | $L_{001}$       | $L_{110}$       | $S_{100}^{010}$ | $S_{100}^{001}$ | $S_{010}^{100}$ | $S_{001}^{110}$ | $S_{110}^{110}$ |                    |
| Бастрон, ниобат<br>бария-стронция<br>$\text{Sr}_{(0,75-0,5)}\text{Ba}_{(0,25-0,5)}\text{Nb}_2\text{O}_6$ | 5,4                         | —                     | —               | 5,5             | —               | —               | —               | —               | —               | —               | [151]              |
| Дигидрофосфат ам-<br>мония $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$                                            | 1,80                        | 6,15                  | —               | 4,35            | —               | 1,83            | —               | —               | —               | —               | [151, 176]         |
| Каломель $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$                                                                        | 6,97                        | 1,6224                | —               | 3,3434          | —               | 1,3054          | —               | —               | —               | 0,3471          | [177]              |
| Молибдат свинца<br>$\text{PbMoO}_4$                                                                      | 6,95                        | 3,98                  | —               | 3,632—<br>3,750 | —               | 2,20            | 1,961—<br>1,980 | —               | —               | —               | [178—182]          |
| Парателлурит $\text{TeO}_2$                                                                              | 5,9                         | 3,051                 | —               | 4,14—<br>4,30   | —               | 3,317           | 2,100           | —               | 2,08            | 0,616—<br>0,618 | [181,<br>185—188]  |
| Рутил $\text{TiO}_2$                                                                                     | 4,28                        | 7,929—<br>8,014       | 7,929—<br>7,958 | 10,94           | 9,935—<br>9,950 | 6,756           | 5,424           | 6,700           | 5,399           | 3,300           | [181, 183,<br>184] |
| Титанат свинца<br>$\text{PbTiO}_3$                                                                       | 7,95                        | —                     | —               | 4,19            | —               | —               | —               | —               | —               | —               | [189]              |
| $\text{TlInSe}_2$                                                                                        | 7,18                        | 2,48                  | 2,48            | 2,48            | —               | 1,35*           | —               | —               | —               | —               | [169]              |
| $\text{TlGaSe}_2$                                                                                        | 6,34                        | 3,25                  | —               | 2,67            | —               | 0,767*          | —               | —               | —               | —               | [169]              |
| $\text{TlGaS}_2$                                                                                         | 5,72                        | 3,0                   | —               | 2,5             | —               | 1,0*            | —               | —               | —               | —               | [169]              |

\* Поляризация не указана.

Таблица 7.20. Скорость звука в тригональных кристаллах ( $t \simeq 20^\circ \text{C}$ )

| Кристалл        | $\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$ | $v, 10^3 \text{ м/с}$ |                   |                  |                  |                 |                 |                  |                     |                   |                   | Литература              |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|                 |                             | $L_{100}$             | $L_{010}$         | $L_{001}$        | $S_{100}^{010}$  | $S_{100}^{001}$ | $S_{010}^{100}$ | $S_{010}^{001}$  | $S_{001}^{100,010}$ | $S_{010}^*$       | $QS_{010}$        |                         |
| Германат свинца | 7,29                        | 3,01                  | —                 | 3,47             | —                | —               | 1,67            | —                | —                   | —                 | —                 | [190]                   |
| Кварц           | 2,65                        | 5,747—<br>5,7509      | 6,0061—<br>6,0070 | 6,318—<br>6,325  | 3,2978           | 5,1145          | —               | —                | 4,687—<br>4,6895    | 3,9158—<br>3,9169 | 4,3207—<br>4,3249 | [137, 191—<br>194, 196] |
| Киноварь        | 8,10                        | —                     | —                 | 2,450            | —                | —               | —               | —                | —                   | —                 | —                 | [197]                   |
| Ниобат лития    | 4,62                        | 6,54—<br>6,54873      | 6,829—<br>6,8822  | 7,271—<br>7,3328 | 4,034—<br>4,0593 | 4,76—<br>4,8012 | 3,94—<br>3,9615 | 4,457—<br>4,4943 | 3,57—<br>3,59       | 4,46—<br>4,46667  | —                 | [198—204,<br>209]       |
| Прусит          | 5,63                        | 3,2                   | 2,98              | 2,60             | —                | —               | —               | —                | 1,28                | 1,50              | —                 | [204]                   |
| Сапфир          | 3,97                        | 11,03—<br>11,235      | —                 | 11,15            | 5,72             | 6,780           | —               | —                | —                   | —                 | —                 | [205—207]               |
| Теллур          | 6,25                        | 2,41                  | —                 | 2,3              | —                | —               | 1,47*           |                  | —                   | —                 | —                 | [135—208]               |

\* Поляризация не указана.

Таблица 7.21. Скорость звука в ромбических кристаллах

| Кристалл                     | $10^3 \rho, \text{ кг/м}^3$ | $v, 10^3 \text{ м/с}$ |                 |                 |                 |                 |                 | Другие кристаллографические направления                                                    | Литература          |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|                              |                             | $L_{100}$             | $L_{010}$       | $L_{001}$       | $S_{100}^{010}$ | $S_{100}^{001}$ | $S_{010}^{001}$ |                                                                                            |                     |
| Банан, ниобат бария — натрия | 5,41                        | 3,365                 | 3,415           | 3,075           | —               | —               | —               |                                                                                            | [210]               |
| Бифталат: калия              | 1,64                        | 3,382                 | 2,892           | 3,347           | 1,996           | 2,137           | 1,774           |                                                                                            | [211]               |
| рубиния                      | 1,93                        | 3,21                  | 2,68            | 2,85            | —               | —               | —               |                                                                                            | [212]               |
| цезия                        | 2,18                        | 3,27                  | 2,51            | 2,54            | —               | —               | —               |                                                                                            | [212]               |
| Германат лития               | 3,50                        | 6,50—<br>6,66         | —               | —               | —               | 3,72—<br>3,75   | 4,04—<br>4,10   |                                                                                            | [213, 214]          |
| Германат натрия кобальта     | —                           | 5,54                  | 5,26            | 5,43            | 3,23            | —               | —               | 2,24* ( $S_{001}$ )                                                                        | [215]               |
| Дигидрофосфат калия          | 2,34                        | 5,41—<br>5,50         | —               | 4,86            | —               | —               | —               |                                                                                            | [151]               |
| Иодноватая кислота           | 4,63—<br>5,00               | 3,65                  | 2,89            | 2,44            | 1,84            | —               | —               |                                                                                            | [216]               |
| Молибдат гадолиния           | 4,58                        | 3,368—<br>3,900       | 3,853—<br>3,995 | 4,646           | 2,340—<br>2,708 | —               | 2,349—<br>2,360 | 4,500 ( $L_{110}$ ); 4,135 ( $L_{110}$ );<br>2,383* ( $S_{001}$ );<br>2,360* ( $S_{001}$ ) | [217—219]           |
| Ортоселенофосфат таллия      | 6,1                         | 2,2                   | 2,2             | 2,2             | 1,1             | —               | —               |                                                                                            | [169]               |
| Ортосульфатарсенид таллия    | —                           | 2,15                  | —               | —               | —               | —               | —               | 1,21* ( $S_{001}$ )                                                                        | [214, 220]          |
| Сульфонид сурьмы             | 5,25                        | 2,1—<br>2,7           | —               | —               | —               | —               | —               | 1,7 ( $L_{\perp 001}$ ); 1,0* ( $S_{\perp 001}$ )                                          | [221]               |
| Танталат лития               | 7,45                        | 5,550—<br>5,5522      | 5,6917          | 6,160—<br>6,476 | 3,3556          | 4,210           | —               | 3,529 ( $S_{010}^{100}$ )                                                                  | [147, 150, 198—200] |

\* Поляризация не указана.

Таблица 7.22. Скорость распространения поверхностных акустических волн

| Кристалл, точечная группа             | Срез (плоскость) | Направление распространения | Скорость $v_R$ ,<br>10 м <sup>3</sup> м/с | $\Delta v_R/v_R$ , 10 <sup>-4</sup> | Литература |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| Арсенид галлия, $\bar{4}3m$           | Z                | 100                         | 2,719                                     | 0; 1,18                             | [222]      |
|                                       |                  | 110                         | 2,863                                     | —                                   | [223]      |
|                                       |                  | X+25°                       | 2,750                                     | 3                                   | [224]      |
|                                       |                  | X+23°                       | 2,760                                     | 2,85                                | [225]      |
|                                       |                  | 110+45°                     | 2,480                                     | —                                   | [225]      |
|                                       | X                | 100                         | 2,332                                     | —                                   | [226]      |
|                                       |                  | 010                         | 2,720                                     | 0                                   | [227]      |
|                                       |                  | 110                         | 2,773                                     | 8                                   | [226]      |
|                                       |                  | 011                         | 2,8645                                    | 3,40                                | [227]      |
|                                       |                  | 210                         | 2,725                                     | 70                                  | [226]      |
|                                       | XY               | 001                         | 2,819                                     | 1,16                                | [222]      |
|                                       |                  | 100                         | 2,542                                     | 13                                  | [226]      |
|                                       |                  | 110                         | 2,820                                     | 0,95                                | [227]      |
|                                       |                  | 110                         | 2,399                                     | —                                   | [223]      |
|                                       |                  | 111                         | 2,512                                     | 19                                  | [226]      |
|                                       | 111              | 111                         | 2,694                                     | 62                                  | [226]      |
|                                       |                  | 110                         | 2,428                                     | —                                   | [222]      |
|                                       |                  | 112                         | 2,525                                     | —                                   | [226]      |
|                                       |                  | 211                         | 3,0826                                    | 0                                   | [227]      |
|                                       |                  | 111                         | 2,621                                     | 1,2                                 | [248]      |
| Антимонид индия, $\bar{4}3m$<br>Банан | Z                | 100                         | 1,84                                      | —                                   | [228]      |
|                                       | X                | Y+45°                       | 3,32                                      | 12                                  | [228]      |
|                                       | Y                | 001                         | 3,177                                     | 5                                   | [227]      |
|                                       |                  | 100                         | 3,46                                      | 0                                   | [227]      |
|                                       |                  |                             |                                           |                                     |            |
| Берлинит, 32                          | X                | Y+19°                       | 2,754                                     | 24                                  | [229]      |
| Борат лития                           | X                | Y+175,2°                    | 2,865                                     | 26,4                                | [229]      |
| Ванадосульфат галлия,<br>$\bar{4}3m$  | X                | 001                         | 3,51                                      | 40                                  | [135]      |
|                                       |                  | 100                         | 0,870                                     | —                                   | [169]      |
| Галлат:<br>висмута                    | X                | 110                         | 1,61                                      | $\kappa = 1,76\%$                   | [230]      |
| лития                                 | X                | 010                         | 3,173                                     | 55                                  | [231]      |
| Германий, $m3m$                       | Z                | 100                         | 2,934                                     | 0,1                                 | [155]      |
|                                       | XY               | 001                         | 3,015                                     | 0,1                                 | [155]      |
|                                       | 111              | 110                         | 2,683                                     | —                                   | [155]      |
| Германат висмута, 23                  | Z                | 110                         | 1,681                                     | 68                                  | [232]      |
|                                       |                  | 100                         | 1,620                                     | 0                                   | [223]      |
|                                       |                  | X+30°                       | 1,654                                     | 55                                  | [223]      |
|                                       | XY               | 001                         | 1,5935                                    | 22                                  | [227]      |
|                                       |                  |                             | 1,620                                     | 37                                  | [233]      |
| Иодат лития, 6                        |                  | 110                         | 1,7812                                    | 0                                   | [227]      |
|                                       |                  | 110                         | 1,708                                     | 82                                  | [232]      |
|                                       | X                | 001                         | 1,909                                     | 26,2                                | [234]      |
|                                       | Z                | 100                         | 2,258                                     | 443                                 | [234]      |
|                                       | X                | 010                         | 3,256                                     | —                                   | [235, 236] |
| Кварц, 32                             | Y                | 100                         | 3,154                                     | —                                   | [235, 236] |
|                                       |                  |                             | 3,159                                     | 9                                   | [232]      |
|                                       | Z                | 010                         | 3,258                                     | —                                   | [232]      |
|                                       |                  |                             | 3,2617                                    | —                                   | [228]      |
|                                       | YX               |                             | 3,1616                                    | —                                   | [238]      |
|                                       | ST               | 100                         | 3,158                                     | 5,8                                 | [232]      |
|                                       |                  |                             |                                           | 6,7                                 | [247]      |
|                                       |                  |                             |                                           |                                     |            |



| Кристалл, точечная группа          | Срез (плоскость) | Направление распро-<br>странения | Скорость $v_R$ ,<br>$10^3$ м/с | $\Delta v_R/v_R$ , $10^{-4}$ | Литература      |
|------------------------------------|------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Кварц плавленый                    | —                | —                                | 3,411                          | —                            | [223]           |
| Керамика:                          | —                | —                                | 2,253                          | —                            | [238]           |
| ЦТС-23                             | —                | —                                | 1,8507                         | —                            | [238]           |
| ПКР-2                              | —                | —                                | 2,2                            | 220                          | [135]           |
| РТ-4                               | —                | —                                | 4,92                           | —                            | [228]           |
| Кремний, $m3m$                     | Z                | 100                              | 1,457                          | —                            | [135]           |
| Молибдат свинца, $4/m$             | X                | 010                              | 1,458793                       | —                            | [248]           |
|                                    | Y                | 100                              | 3,798                          | 260                          | [227, 239, 240] |
|                                    | Z                | 100                              |                                |                              |                 |
| Ниобат лития, $3m$                 | X                | 001                              | 3,483                          | 252                          | [227, 239, 240] |
|                                    | Y                | 001                              | 3,488                          | 241                          | [227, 239, 240] |
|                                    | Y + 16,5°        | 100                              | 3,503                          | 268                          | [232]           |
|                                    | Y + 41,5°        | 100                              | 4,000                          | 277                          | [232]           |
|                                    | Y + 127,86°      | 100                              | 3,950                          | —                            | [225]           |
| Оксид:                             |                  |                                  |                                |                              |                 |
| магния, $m3m$                      | Z                | 100                              | 5,513                          | 120                          | [241]           |
|                                    | XY               | 001                              | 5,640                          | 118                          | [241]           |
| цинка, $6mm$                       | 111              | $\bar{1}10$                      | 5,114                          | —                            | [241]           |
|                                    | X                | 010                              | 2,8378                         | 17,44                        | [227]           |
|                                    |                  | 001                              | 2,7524                         | 0                            | [227]           |
|                                    | Z                | Любое                            | 2,80                           | 0                            | [227]           |
|                                    |                  |                                  | 2,64                           | 45                           | [135]           |
| Парателлурит, 422                  | Z                | Y + 40°                          | 1,4                            | —                            | [242]           |
|                                    | X                | 110                              | 1,673                          | 83                           | [135]           |
| Селен                              | Y                | 100                              | 0,813                          | $k = 1,7\%$                  | [135]           |
|                                    |                  | 001                              | 1,54                           | $k = 0,8\%$                  | [135]           |
| Силикат висмута, 23                | Z                | 110                              | 1,66                           | —                            | [168]           |
|                                    | 111              | 110                              | 1,61                           | —                            | [168]           |
|                                    | XY               | 110                              | 1,748                          | $\kappa = 1,5\%$             | [135]           |
|                                    |                  | 001                              | 1,601                          | 4                            | [135]           |
| Сульфид кадмия, $6mm$              | X                | 010                              | 1,7302                         | 0                            | [243]           |
|                                    |                  | 001                              | 1,7177                         | 26,1                         | [243]           |
|                                    | Y                | 100                              | 1,700                          | —                            | [222]           |
|                                    |                  | 001                              | 1,716                          | 2,6                          | [223]           |
|                                    |                  | $\perp 001$                      | 1,720                          | 31                           | [235]           |
|                                    | Z                | Любое                            | 1,7308                         | 23,6                         | [243]           |
| Танталат лития, $3m$               | Y                | 100                              | 3,148                          | 3,7                          | [232]           |
|                                    |                  | 001                              | 3,230                          | 33                           | [227, 232]      |
|                                    | Z                | 100                              | 3,205                          | 11,4                         | [232]           |
|                                    |                  | 010                              | 3,329                          | 59                           | [232]           |
|                                    | Z + 22°          | 100                              | 3,302                          | 27                           | [227, 232]      |
| Танталоселенат таллия, $\bar{4}3m$ | XY               | $\bar{1}10$                      | 0,85                           | —                            | [244]           |
|                                    |                  | 001                              | 0,77                           | —                            | [244]           |
| Титанат висмута                    | XY               | 110 + 55°                        | 1,72                           | $k = 1,58\%$                 | [245]           |
| Фосфид галлия, $\bar{4}3m$         | Z                | 100                              | 3,37                           | 0                            | [224]           |
|                                    |                  | X + 23°                          | 3,42                           | 1,1                          | [224]           |
|                                    |                  | X + 45°                          | 3,09                           | 0                            | [224]           |
|                                    | X                | 010                              | 2,827                          | 23                           | [135]           |
| Фресноит, $4mm$                    | Y                | 001                              | 2,50                           | 5                            | [239]           |
|                                    | Z                | 100                              | 2,678                          | 80                           | [239]           |
|                                    | Z + 45°          | 100                              | 2,655                          | 75                           | [135]           |
| Фтористый литий, $m3m$             | Z                |                                  | 3,897                          | —                            | [155]           |
|                                    | XY               |                                  | 4,060                          | —                            | [155]           |
|                                    | 111              |                                  | 3,458                          | —                            | [155]           |
| Хлористый калий, $m3m$             | Z                | 100                              | 1,753                          | —                            | [241]           |

Примечание.  $k$  — коэффициент электромеханической связи.

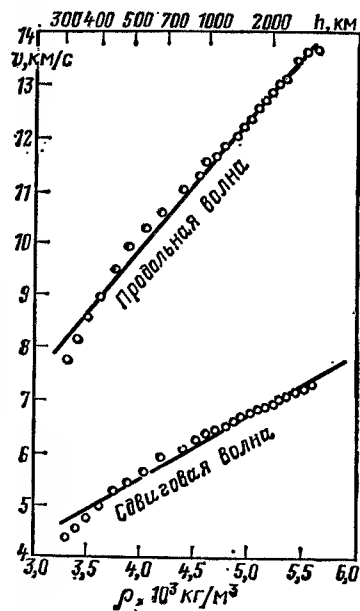


Рис. 7.27. Зависимость скорости звука в мантии Земли от глубины (плотности) [128]

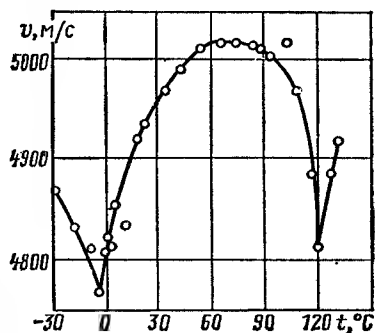


Рис. 7.28. Зависимость скорости звука от температуры в поляризованной керамике титаната бария (продольные колебания по толщине пластинки) [175]

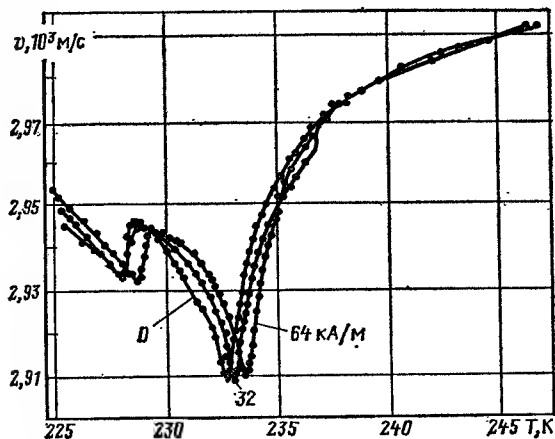


Рис. 7.29. Зависимость скорости продольной волны (30 МГц) вдоль гексагональной оси в тербии от температуры при разной напряженности магнитного поля: в области точки Кюри ( $\sim 228 \text{ K}$ ) и точки Нееля ( $\sim 233 \text{ K}$ ) [195]

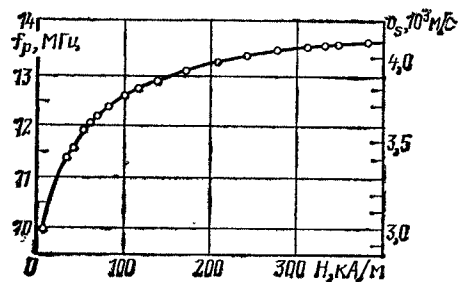


Рис. 7.30. Зависимость от напряженности магнитного поля резонансной частоты колебаний сдвига в пластинке естественного кристалла гематита ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )  $v_s$  — эффективная скорость; направление поля нормально к плоскости пластинки и совпадает с тригональной осью; «легкая плоскость» — в плоскости пластинки [249], см. также [250]

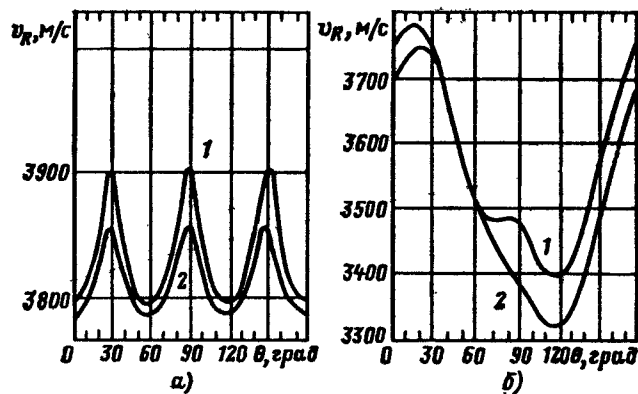


Рис. 7.31. Анизотропия скорости ПАВ в  $\text{LiNbO}_3$ : а — Z-срез,  $\theta$  — угол между осью  $X$  и волновой нормалью; б — X-срез;  $\theta$  — угол между осью  $Y$  и волновой нормалью; 1 — на свободной поверхности; 2 — на металлизированной поверхности [251]

Таблица 7.23. Затухание звука в природных материалах

| Порода                       | Диапазон частот, Гц               | Тип возбуждения             | Q       | Литература |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------|------------|
| Гранит (квинсли)             | 140—1600                          | Продольный резонанс         | 100     | [253]      |
|                              | 140—1600                          | Кручение, изгибный резонанс | 150—200 | [253]      |
| Гранит                       | 50—120                            | Изгиб                       | 57      | [254]      |
|                              | $5 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5$  | Релеевские волны            | 79      | [255]      |
| Долорит                      | 50—120                            | Изгиб                       | 90      | [254]      |
| Диорит                       | 50—120                            | »                           | 125     | [254]      |
| Известняк                    | $5 \cdot 10^6 \div 10^7$          | Продольные импульсы         | 190—110 | [256]      |
|                              | $3 \cdot 10^6 \div 15 \cdot 10^7$ | Сдвиговые импульсы          | 400     | [256]      |
| хантонский                   | $(2,8 \div 10,6) \cdot 10^3$      | Продольный резонанс         | 65      | [257]      |
| солenhoфенский               | $(3 \div 9) \cdot 10^6$           | Сдвиговые импульсы          | 190     | [254]      |
| ракушечник                   | 50—120                            | Изгиб                       | 63      | [254]      |
| оолитовый                    | 50—120                            | »                           | 45      | [257]      |
| Песчаник амхерстовский       | $930 \div 12,8 \cdot 10^3$        | Продольный резонанс         | 52      | [254]      |
| Песчаник                     | 50—120                            | Изгиб                       | 21      | [254]      |
| Покрывающие породы           | $(1,1 \div 6,6) \cdot 10^3$       | Продольный резонанс         | 45      | [257]      |
|                              | $100 \div 2 \cdot 10^3$           | Сдвиговый резонанс          | 52      | [257]      |
| Сланец глинистый сильванский | $(3,4 \div 12,8) \cdot 10^3$      | Продольный резонанс         | 73      | [257]      |

Таблица 7.24. Затухание звука в металлах, стеклах и пластмассах

| Вещество                       | Диапазон частот, Гц         | Тип возбуждения     | Добротность Q, $10^3$ | $\alpha/f$ , $10^{-7}$ с/м | Литература |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|------------|
| Алюминий                       | $(3,1 \div 7,5) \cdot 10^6$ | Продольные импульсы | 5,9                   | 0,85                       | [258]      |
|                                | $(5 \div 15) \cdot 10^6$    |                     | 7,63                  | 0,64                       | [258]      |
|                                | $(3,5 \div 4,5) \cdot 10^6$ | Сдвиговые импульсы  | 19,4                  | 0,53                       | [258]      |
|                                | $(3 \div 6,8) \cdot 10^6$   |                     | 17,2                  | 0,59                       | [258]      |
| монокристалл в направлении 110 | $(1 \div 200) \cdot 10^5$   | Продольный резонанс | 150                   | 0,03                       | [259]      |
|                                | $(1,5 \div 6) \cdot 10^7$   | Продольные импульсы | 1,09                  | 4,6                        | [260]      |
| Латунь                         | $10^7$                      | То же               | —                     | 70                         | [267]      |
|                                | $9 \cdot 10^6$              | Сдвиговые импульсы  | —                     | 160                        | [267]      |
| Магний                         | $(2 \div 100) \cdot 10^3$   | Продольные волны    | 4,9                   | 1,08                       | [258]      |
|                                | $(7 \div 76) \cdot 10^6$    | Продольные импульсы | 0,965                 | 5,5                        | [262]      |
| Медь:                          | 10—18                       | Продольное          | 2,14                  | 3,10                       | [263]      |
|                                | $(2,5 \div 30) \cdot 10^3$  | Продольный резонанс | 2,18                  | 3,10                       | [264]      |
|                                | $(2,5 \div 30) \cdot 10^3$  | Сдвиговый резонанс  | 4,38                  | 3,20                       | [264]      |
|                                | 1—6                         | Изгиб               | 0,98                  | —                          | [265]      |
|                                | 11—25                       | »                   | 0,64                  | —                          | [266]      |
| неотожженная                   | $(1,5 \div 6,5) \cdot 10^7$ | Продольные импульсы | 1,77                  | 3,6                        | [260]      |
| отожженная                     | $(2,5 \div 7,5) \cdot 10^7$ | То же               | 5,83                  | 1,1                        | [260]      |
| Молибден                       | 8—30                        | Изгиб               | 0,465                 | —                          | [266]      |
| Монель                         | 8—32                        | »                   | 1,40                  | —                          | [266]      |
| Никель:                        |                             |                     |                       |                            |            |
| монокристалл                   | $10^7$                      | Продольные волны    | —                     | 1,0                        | [268]      |
| поликристалл                   | $8 \cdot 10^6$              | Продольные импульсы | —                     | 102                        | [267]      |
|                                | $2,5 \cdot 10^6$            | Сдвиговые импульсы  | —                     | 233                        | [267]      |
|                                | 12—33                       | Изгиб               | 0,96                  | —                          | [266]      |
| Органическое стекло            | $10^6$                      | Продольные волны    | —                     | 250                        | [256]      |
| Плавленный кварц               | $(0,2 \div 1,5) \cdot 10^7$ | Сдвиговые волны     | —                     | 0,19                       | [258]      |
|                                | $5 \cdot 10^8$              | То же               | —                     | 0,1                        | [150]      |
|                                | $(0,2 \div 1,5) \cdot 10^7$ | Продольные волны    | —                     | 1,23                       | [258]      |
|                                | $5 \cdot 10^8$              | То же               | —                     | 0,7                        | [150]      |
| Полистирол                     | $10^6$                      | »                   | —                     | 170                        | [256]      |
| Полиэтилен                     | $10^6$                      | »                   | —                     | 520                        | [256]      |
| Свинец                         | $(1,6—15) \cdot 10^3$       | Продольное          | $3,6 \cdot 10^{-2}$   | 400                        | [264]      |
|                                | $(1—9) \cdot 10^3$          | Сдвиговое           | $3,4 \cdot 10^{-2}$   | 1400                       | [264]      |
| Сталь:                         | 5—10                        | Продольное          | 5,0                   | 1,0                        | [263]      |
|                                | 2—8                         | Изгиб               | 1,85                  | —                          | [265]      |
| +3,5% Ni                       | 8—25                        | »                   | 1,36                  | —                          | [266]      |
| вольфрамоуглеродистая          | $(2—100) \cdot 10^3$        | Продольное          | —                     | 0,38                       | [258]      |
| молибденовая                   | $(2—100) \cdot 10^3$        | »                   | —                     | 1,42                       | [258]      |
| Стекло:                        |                             |                     |                       |                            |            |
| пирекс                         | $(2 \div 15) \cdot 10^6$    | Продольные волны    | —                     | 4,89                       | [258]      |
| свинцовое                      | $(2 \div 15) \cdot 10^6$    | То же               | —                     | 3,21                       | [258]      |

Таблица 7.25. Поглощение звука в кристаллах ( $t = 20^\circ \text{C}$ )

| Кристалл, сингония, точечная группа                                        | Тип волны, направление распространения | $\Gamma$ , дБ/мкс ( $f$ , ГГц)                | $10^2$ дБ/м ( $f$ , ГГц) | $10^2$ дБ/(м·ГГц <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Антимонид индия, куб., $\bar{4}3m$ [135, 317, 274]                         | $L_{100}$                              | 40(1)                                         | 4,8(0,11)                | —                               |
|                                                                            | $L_{110}$                              | 8(0,5)                                        | —                        | —                               |
|                                                                            | $S_{100}$                              | 40(1)                                         | —                        | —                               |
|                                                                            | $S_{001}$                              | —                                             | 5,1(0,58)                | —                               |
|                                                                            | $S_{110}$                              | 3,8(1)                                        | 4,5(0,58)                | —                               |
|                                                                            | $S_{1\bar{1}0}$                        | 5(1)                                          | —                        | —                               |
| Арсенид галлия, куб., $\bar{4}3m$ [135, 275]                               | $S_{110}$                              | 8(1)                                          | 8,8(0,58)                | —                               |
|                                                                            | $S_{111}$                              | —                                             | 6,2(0,58)                | —                               |
|                                                                            | $L_{110}$                              | 0,6(0,2)                                      | —                        | 30 [227]                        |
|                                                                            | $L_{111}$                              | 4,0(0,5)                                      | —                        | —                               |
|                                                                            | $S_{100}$                              | 0,7(0,2)                                      | —                        | —                               |
|                                                                            | Вдоль $c$                              | —                                             | —                        | —                               |
| Банан, ромб., $mm2$ [276]                                                  | Вдоль $a$                              | —                                             | 0,1(0,077)               | —                               |
|                                                                            |                                        |                                               | 0,4(0,5)                 | —                               |
|                                                                            |                                        |                                               | 250K                     | —                               |
| Бастрон, тетр., $4mm$ [277, 135]                                           |                                        |                                               | 0,4(0,5)                 | —                               |
|                                                                            |                                        |                                               | 250K                     | —                               |
|                                                                            |                                        |                                               | 61(0,1)                  | —                               |
| Бифталат калия, ромб., $2m$ [212]                                          | $L_{001}$                              | —                                             | $\leq 1,0(0,5)$          | —                               |
|                                                                            | $L_{100}$                              | 1,1(0,4)                                      | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{010}$                              | 1,5(0,4)                                      | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{001}$                              | 0,68(0,4)                                     | —                        | —                               |
|                                                                            | $FS_{100}$                             | 0,35(0,4)                                     | —                        | —                               |
|                                                                            | $FS_{010}$                             | 0,56(0,4)                                     | —                        | —                               |
| Бифталат рубидия, ромб., $2m$ [212]                                        | $L_{100}$                              | 0,29(0,4)                                     | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{010}$                              | 0,90(0,4)                                     | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{001}$                              | 9,36(0,4)                                     | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{001}$                              | 0,15(1)                                       | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{100}$                              | —                                             | —                        | 36*                             |
|                                                                            | $L_{110}$                              | —                                             | —                        | 25*                             |
| Бор, триг., $\bar{3}m$ [135]                                               | $L_{111}$                              | —                                             | —                        | 17*                             |
|                                                                            | $S_{001}, S_{110}$                     | —                                             | —                        | 6*                              |
|                                                                            | $S_{1\bar{1}0}$                        | —                                             | —                        | 40*                             |
|                                                                            | $S_{110}$                              | —                                             | —                        | —                               |
|                                                                            | $S_{111}$                              | —                                             | —                        | 38*                             |
|                                                                            | $L_{001}$                              | —                                             | 13(0,05)                 | —                               |
| Бромистый калий, куб., $m3m$ [282]                                         | $S_{001}$                              | —                                             | 0,4(0,05)                | —                               |
|                                                                            | $L_{100}$                              | $\begin{cases} 1,3(0,3) \\ 11(1) \end{cases}$ | 23(1)                    | 29,6                            |
|                                                                            | $L_{110}$                              | 10(1)                                         | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{111}$                              | 4,2(0,5)                                      | —                        | 30                              |
|                                                                            | $S_{001}, S_{110}$                     | 2(1)                                          | —                        | —                               |
|                                                                            | $S_{100}$                              | 0,29(0,3)                                     | 10(1)                    | 9                               |
| Германий, куб., $m3m$ [135, 151, 279—282, 317]                             | $L_{100}$                              | —                                             | 2(0,025)                 | —                               |
|                                                                            | $L_{001}$                              | —                                             | 4(0,8)                   | —                               |
|                                                                            | $L_{010}$                              | 0,11(0,5)                                     | 4(0,8)                   | —                               |
|                                                                            | $L_{100}$                              | —                                             | —                        | 150                             |
| Германат висмута, куб., $23$ [135, 283]                                    | $L_{010}$                              | —                                             | 2(0,1)                   | —                               |
|                                                                            | $L_{001}$                              | —                                             | $\sim 30(0,4)$           | —                               |
|                                                                            | $L_{100}$                              | —                                             | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{110}$                              | —                                             | —                        | —                               |
| Германат свинца, гекс., $6$ [151, 190]                                     | $L_{100}$                              | 0,07(0,5)                                     | 0,2—0,32(1)              | —                               |
|                                                                            | $L_{110}$                              | 0,6(1,5)                                      | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{111}$                              | —                                             | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{001}$                              | —                                             | —                        | —                               |
| Гранат:<br>алюмоиттриевый, куб., $m3m$ [135, 150, 206, 279, 282, 284, 285] | $L_{100}$                              | —                                             | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{110}$                              | —                                             | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{111}$                              | —                                             | —                        | —                               |
|                                                                            | $L_{001}$                              | —                                             | —                        | —                               |

| Кристалл, сингония, точечная группа                    | Тип волны, направление распространения | $\Gamma$ , дБ/мкс ( $f$ , ГГц) | $10^2 \frac{a}{f^2}$ , дБ/м ( $f$ , ГГц) | $10^2 \frac{a/f^2}{(m \cdot \Gamma \text{Гц}^2)}$ |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| галлиевоиттриевый, куб., $m3m$ [135]                   | $L_{110}$                              | 1,8 (1,8)                      | —                                        | 0,25                                              |
|                                                        | $L_{111}$                              | 5 (3)                          | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{110}$                              | 15 (9,4)                       | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{100}$                              | 14 (9,4)                       | 0,4 (0,9)                                | 1,1                                               |
|                                                        | $S_{100}$                              | 7 (9,4)                        | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{100}$                              | 0,36 (1,5)                     | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L_{100}$                              | 0,7 (1)                        | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{100}$                              | 0,1 (1)                        | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{110}$                              | 5,9; 18 (9)                    | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L_{110} = L_{111}$                    | 1,0 (1)                        | —                                        | —                                                 |
| железоиттриевый, куб., $m3m$ [135, 151, 279, 286, 312] | $L_{100}$                              | 1,0 (1)                        | 2 (1)                                    | 1,1                                               |
|                                                        | $S_{100}$                              | 0,6 (1,5)                      | 3,2 (1,12)                               | 0,35                                              |
|                                                        | $S_{100}$                              | 0,13 (1)                       | 0,34 (1)                                 | —                                                 |
|                                                        | $L_{010}$                              | —                              | 0,8 (0,1)                                | —                                                 |
| Германованадат свинца, гекс. $6/m$ [170]               | $L_{001}$                              | —                              | 2,1 (0,3)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | —                              | 0,5 (0,1)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | —                              | 2,1 (0,3)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | —                              | —                                        | —                                                 |
| Иодат лития, гекс., $6$ [135, 171, 287]                | $L_{100}$                              | 1,1 (0,15)                     | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L_{002}$                              | 9,1 (0,15)                     | 20 (0,002)                               | —                                                 |
|                                                        | $L_{002}$                              | —                              | 36 (0,008)                               | —                                                 |
|                                                        | $L_{002}$                              | —                              | 7,5 (0,14)                               | —                                                 |
| Иодноватая кислота, ромб., 222 [135, 216]              | $S_{100, 010}^{001}$                   | 1,6 (0,15)                     | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{100, 010}^{1001}$                  | 0,29 (0,15)                    | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L_{010}$                              | 0,73 (0,5)                     | 2,5 (0,5)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | 0,61 (0,5)                     | —                                        | —                                                 |
| Карбид кремния, гекс., $6mm$ [135]                     | $L_{0001}$                             | 56 (9,4)                       | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L_{1010}$                             | 50 (9,4)                       | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{0001}$                             | 22 (9,4)                       | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{1010}$                             | 19 (9,4)                       | —                                        | —                                                 |
| Кварц, триг., 32 [135, 206, 288, 290, 291]             | $L_{001}$                              | 1,3 (1)                        | —                                        | 3,25 [289]                                        |
|                                                        | $L_{100}$                              | 1,7 (1)                        | 1,3 (0,73)                               | 4,2 [289]                                         |
|                                                        | $L_{100}$                              | 3,5 (1,8)                      | 9,0 (1,96)                               | 3,0 [151]                                         |
|                                                        | $L_{100}$                              | —                              | 26,3 (3,38)                              | —                                                 |
| KRS-5, куб., $m3m$ [135, 292]                          | $S_{100}^{001}$                        | —                              | 0,2 (0,5)                                | —                                                 |
|                                                        | $S_{010}$                              | 3,5 (1,8)                      | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{001}$                              | —                              | 2 (1,01)                                 | —                                                 |
|                                                        | $S_{AC}$                               | 1,65 (1,5)                     | —                                        | —                                                 |
| KRS-6, куб., $m3m$ [293]                               | $L_{111}$                              | —                              | ~8 (0,5)                                 | —                                                 |
|                                                        | $L_{110}$                              | 0,3 (0,1)                      | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L$                                    | —                              | 0,8 (0,1)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | 7 (1)                          | 4,55 (0,4)                               | —                                                 |
| Киноварь, триг., 32 [135, 197]                         | $L_{001}$                              | —                              | 7,1 (0,5)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | —                              | 7,6 (1,03)                               | —                                                 |
|                                                        | $L_{100}$                              | 7 (1)                          | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L_{100}$                              | 7,1 (1)                        | —                                        | —                                                 |
| Кремний, куб., $m3m$ [135, 274, 317]                   | $L_{110}$                              | 6 (1)                          | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $L_{111}$                              | 2,3 (0,5)                      | 5,9 (1,03)                               | 6,5 [151]                                         |
|                                                        | $L_{111}$                              | 6 (1)                          | —                                        | —                                                 |
|                                                        | $S_{100}$                              | 1,4 (1)                        | 2,2 (1)                                  | —                                                 |
| Молибдат свинца, тетр., $4/m$ [180, 181, 295]          | $FS_{110}$                             | 1,6 (1)                        | 2,55 (1,03)                              | —                                                 |
|                                                        | $L_{100}$                              | —                              | 2,5 (0,5)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | 1,0 (0,5)                      | 0,3 (0,1)                                | —                                                 |
|                                                        | $S_{100}^{001}$                        | —                              | 0,16 (0,2)                               | —                                                 |
| Молибдат свинца двойной, моноклин. [135, 296, 297]     | $L_{100}$                              | —                              | 4,2 (0,3)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{010}$                              | —                              | ~4 (0,1)                                 | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | —                              | 2,5 (0,5)                                | —                                                 |
|                                                        | $L_{001}$                              | —                              | —                                        | —                                                 |

| Кристалл, сингония, точечная группа                           | Тип волны, направление распространения | $\Gamma$ , дБ/мкс ( $f$ , ГГц) | $10^2 \frac{\alpha}{dB/M}$ ( $f$ , ГГц)                                                                                                                                                       | $10^2 \frac{\alpha/f^2}{dB/(M \cdot ГГц^2)}$ |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Никель, куб., $m\bar{3}m$ [315]                               | $L_{110}$                              | —                              | $\sim 5$ (0,09)<br>$\sim 0,7$ (0,0058)                                                                                                                                                        | —                                            |
|                                                               | $S_{110}^{001}$                        | —                              | 1,8 (0,0095)<br>4,6 (0,029)                                                                                                                                                                   | —                                            |
| Ниобат лития, триг., $3m$ [135, 158, 202, 203, 209, 294]      | $L_{100}$                              | —                              | 0,29 (0,4)<br>1,39 (1)<br>0,86 (1)                                                                                                                                                            | —                                            |
|                                                               | $L_{010}$                              | 0,065 (0,5)                    | 0,16 (0,4)<br>0,78 (1)<br>0,71 (1)                                                                                                                                                            | —                                            |
|                                                               | $L_{001}$                              | 0,03 (0,5)<br>1,3 (2)          | 0,03 (0,4)<br>0,17 (1)<br>0,32 (1)<br>0,34 (1)                                                                                                                                                | —                                            |
|                                                               | $S_{100}$                              | 0,07 (0,5)                     | $FS \begin{cases} 0,17 (0,4) \\ 1,04 (1) \\ 0,81 (1) \\ 1,71 (1,1) \\ 4,98 (2) \end{cases}$<br>$SS$ 0,66 (1)                                                                                  | —                                            |
|                                                               | $S_{010}$                              | —                              | $FS \begin{cases} 0,17 (0,4) \\ 0,96 (1) \\ 0,73 (1) \\ 1,05 (1,1) \\ 3,50 (2) \end{cases}$<br>$SS \begin{cases} 0,14 (0,4) \\ 1,13 (1) \\ 1,24 (1) \\ 2,31 (1,1) \\ 5,81 (1,74) \end{cases}$ | —                                            |
|                                                               | $S_{001}$                              | 5,0 (2,3)                      | 0,39 (0,4)<br>2,44 (1)<br>4,3 (1)                                                                                                                                                             | —                                            |
| Оксид:                                                        |                                        |                                |                                                                                                                                                                                               |                                              |
| бериллия, гекс., $6mm$ [135]                                  | $L_{0001}$                             | 1,3 (1)                        | —                                                                                                                                                                                             | —                                            |
| магния, куб., $m\bar{3}m$ [135, 275, 279, 282, 298, 299, 317] | $L_{100}$                              | 3 (1)<br>4,5 (1)               | 3,30 (1)                                                                                                                                                                                      | —                                            |
|                                                               | $L_{110}$                              | 1,5 (1)                        | —                                                                                                                                                                                             | —                                            |
|                                                               | $L_{111}$                              | 1,0 (1)                        | —                                                                                                                                                                                             | —                                            |
|                                                               | $L_{0001}$                             | 1,0 (0,2)<br>4,4 (1)           | 0,04 (0,1)<br>15 (1)                                                                                                                                                                          | —                                            |
|                                                               | $S_{100}$                              | 0,21 (1)                       | 0,44 (1)                                                                                                                                                                                      | —                                            |
|                                                               | $S_{110}^{001}$                        | 0,6 (1)                        | —                                                                                                                                                                                             | —                                            |
|                                                               | $S_{110}^{\bar{1}\bar{1}0}$            | 6,5 (1)                        | —                                                                                                                                                                                             | —                                            |
| цинка, гекс., $6mm$ [275]                                     | $S$                                    | 0,5 (0,2)                      | —                                                                                                                                                                                             | —                                            |
| Ортосиликат висмута, куб., $\bar{4}3m$ [283]                  | $L_{111}$                              | —                              | —                                                                                                                                                                                             | 0,95                                         |
|                                                               | $S_{110}^{001}$                        | —                              | —                                                                                                                                                                                             | 0,75                                         |
| Парателлурит, тетр., 422 [135]                                | $L_{001}$                              | 3 (1)                          | —                                                                                                                                                                                             | 6,5** [297]                                  |
|                                                               | $S_{110}^{\bar{1}\bar{1}0}$            | 18 (1)                         | —                                                                                                                                                                                             | 16** [297]                                   |
| Пираргирит, триг., $3m$ [300]                                 | $L_{100}$                              | —                              | 1,3 (0,003)                                                                                                                                                                                   | —                                            |
| Прустит, триг., $3m$ [301, 302, 135]                          | $L_{100}$                              | 1,5 (0,56)                     | —                                                                                                                                                                                             | —                                            |
|                                                               | $L_{001}$                              | 0,25 (0,05)<br>2,5 (0,56)      | $\sim 8$ (0,5)                                                                                                                                                                                | 4,5** [297]                                  |

| Кристалл, сингония, точечная группа             | Тип волны, направление распространения | $\Gamma$ , дБ/мкс ( $f$ , ГГц) | $10^2 \frac{\alpha}{f^2}$ , дБ/м <sup>2</sup> ( $f$ , ГГц) | $10^2 \frac{\alpha}{f^2}$ , дБ/(м · ГГц <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Рутил, тетр., $4/mmm$ [135, 141, 150, 206, 303] | $L_{100}$                              | 1,9 (1)                        | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{110}$                              | 2,5 (1)                        | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{001}$                              | 0,1 (0,5)                      | 0,5 (0,5)                                                  | —                                                      |
|                                                 |                                        | 0,6 (1)                        | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        | 7 (1,8)                        | —                                                          | —                                                      |
| Рубин, триг., $\bar{3}m$ [305—307]              | $S_{001}$                              | 0,22 (1)                       | 3,4 (2,8)                                                  | 0,55 [151]                                             |
|                                                 | $L$                                    | 0,2 (0,6)                      | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{100}$                              | 19 (9,4)                       | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{001}$                              | 15 (9,4)                       | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Сапфир, триг., $\bar{3}m$ [135, 150, 206]       | $L_{100}$                              | 0,05 (0,5)                     | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        | 1 (1,8)                        | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        | 16,5 (9)                       | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{11\bar{2}0}$                       | —                              | —                                                          | 0,2 [151, 309]                                         |
|                                                 | $L_{0001}$                             | 0,22 (1)                       | —                                                          | 0,2 [151, 309]                                         |
|                                                 | $FQS  a$                               |                                | 0,5 (1)                                                    | —                                                      |
|                                                 | $SQS  a$                               | { 1,4 (1)                      | 2,3 (1)                                                    | —                                                      |
|                                                 | $QL  a$                                |                                | 0,2 (1)                                                    | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Селенид:<br>кадмия, гекс., $6mm$ [135, 275]     | $L_{0001}$                             | 3,0 (0,2)                      | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $S_{1010}$                             | { 0,5 (0,2)<br>2,0 (0,2)       | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| ртут [318]                                      | $L_{110}$                              | —                              | ~3 (0,075)                                                 | —                                                      |
|                                                 | $S_{110}^{\bar{1}10}$                  | —                              | ~3,2 (0,075)                                               | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Силикат висмута, куб., 23 [283]                 | $L_{111}$                              | —                              | 5 (0,8)                                                    | —                                                      |
|                                                 | $S_{110}^{001}$                        | —                              | 2 (0,8)                                                    | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Сульфид кадмия, гекс., $6mm$ [135, 275]         | $L_{100}$                              | —                              | —                                                          | 90 [151]                                               |
|                                                 | $L_{0001}$                             | 3,5 (0,2)                      | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        | 80 (1)                         | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{1120}$                             | 17 (1)                         | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $S_{1010}$                             | 0,6 (0,2)                      | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        | 4,5 (1)                        | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Сфалерит, куб., $\bar{4}3m$ [151]               | $L_{001}$                              | —                              | —                                                          | 27                                                     |
|                                                 | $S_{001}$                              | —                              | —                                                          | 130                                                    |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Танталат:<br>калия, триг., $3m$ [314]           | $L$                                    | 0,45 (0,18)                    | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{100}$                              | 0,02 (0,5)                     | 0,1 (0,5)                                                  | 0,1 [150]                                              |
|                                                 | $L_{001}$                              | 0,01 (0,5)                     | 0,02 (0,5)                                                 | —                                                      |
|                                                 | $S_{001}$                              | 4,4—6 (2,3)                    | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Теллур, триг., 32 [135]                         | $L_{100}$                              | —                              | 3—5 (0,5)                                                  | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Титанат стронция, куб., $m\bar{3}m$ [155, 310]  | $L_{100}, L_{010}$                     | 1 (1)                          | 1,7 (0,894)                                                | —                                                      |
|                                                 | $L_{001}$                              | —                              | 1 (0,972)                                                  | —                                                      |
|                                                 | $L_{111}$                              | —                              | 1,5 (0,894)                                                | —                                                      |
|                                                 | $S_{100}$                              | —                              | 1,1 (0,77)                                                 | —                                                      |
|                                                 | $S_{110}$                              | —                              | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
| Турмалин, триг. $3m$ [135]                      | $L_{001}$                              | 16(9)                          | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{110}$                              | 0,4 (0,5)                      | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $L_{111}$                              | 0,4 (0,5)                      | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $SS_{110}$                             | 0,6 (0,5)                      | —                                                          | —                                                      |
|                                                 | $FS_{110}$                             | 0,3 (0,5)                      | —                                                          | —                                                      |
| Фосфид галлия, куб., $\bar{4}3m$ [150, 282]     | $L_{110}$                              | 0,63 (0,4)                     | —                                                          | 6 [311]                                                |
|                                                 |                                        | 1 (0,5)                        | —                                                          | —                                                      |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |
|                                                 |                                        |                                |                                                            |                                                        |

| Кристалл, сингония, точечная группа         | Тип волны, направление распространения | $\Gamma$ ,<br>дБ/мкс, ( $f$ , ГГц) | $\alpha$ ,<br>10 <sup>2</sup> , дБ/м ( $f$ , ГГц) | $\alpha/f^2$ ,<br>10 <sup>2</sup> дБ/(м · ГГц <sup>2</sup> ) |      |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------|
| Фтористый:<br>барий, куб., $m3m$ [135, 153] | $L_{100}$                              | 0,16 (0,2)                         | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $L_{110}$                              | 0,16 (0,2)                         | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $L_{111}$                              | 0,9 (0,5)                          | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $S_{110}^{001}$                        | 0,5 (0,5)                          | —                                                 | —                                                            |      |
| литий, куб., $m3m$ [141, 317]               | $L_{100}$                              | 3,5 (0,9)<br>10 (1)                | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $L_{110}$                              | 1,3 (0,9)<br>2,5 (1)               | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $L_{111}$                              | 0,8 (0,9)<br>1,5 (1)               | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $S_{100}$                              | 0,8 (0,9)                          | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $S_{110}$                              | 0,8 (0,9)                          | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $S_{111}$                              | 5 (0,9)                            | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | магний, тетр., $4/mmm$ [135]           | $L_{001}$                          | 0,7 (0,5)                                         | —                                                            | —    |
|                                             |                                        | $S_{001}^{100}$                    | 0,45 (0,5)                                        | —                                                            | —    |
| натрий, куб., $m3m$ [317]                   |                                        | $L_{100}$                          | 14 (1)                                            | —                                                            | —    |
|                                             | $L_{110}$                              | 6,5 (1)                            | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $L_{111}$                              | 10 (1)                             | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $S_{110}^{001}$                        | 1,0 (1)                            | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | $S_{110}^{1\bar{1}0}$                  | 12 (1)                             | —                                                 | —                                                            |      |
|                                             | стронций, куб., $m3m$ [153, 312]       | $L_{111}$                          | 0,7 (0,5)<br>2,5 (1)                              | —                                                            | —    |
|                                             |                                        | $S_{110}^{001}$                    | 0,5 (0,5)                                         | —                                                            | —    |
|                                             |                                        | $S_{110}^{1\bar{1}0}$              | 0,6 (0,5)                                         | —                                                            | —    |
| Хлористый:<br>калий, куб., $m3m$ [278]      |                                        | $L_{100}$                          | —                                                 | —                                                            | 36*  |
|                                             | $L_{110}$                              | —                                  | —                                                 | 25*                                                          |      |
|                                             | $L_{111}$                              | —                                  | —                                                 | 18*                                                          |      |
|                                             | $S_{100}^{001}, S_{110}^{001}$         | —                                  | —                                                 | 5*                                                           |      |
|                                             | $S_{110}^{1\bar{1}0}$                  | —                                  | —                                                 | 40*                                                          |      |
|                                             | натрий, куб., $m3m$ [135, 312]         | $L_{100}$                          | 3,6 (0,2)<br>30 (1)                               | —                                                            | 18*  |
|                                             |                                        | $L_{110}$                          | 0,56 (0,2)<br>20 (1)                              | —                                                            | 11*  |
|                                             |                                        | $L_{111}$                          | 0,28 (0,2)<br>10 (1)                              | —                                                            | 7*   |
|                                             |                                        | $S_{100}^{001}, S_{110}^{001}$     | —                                                 | —                                                            | 1,9* |
|                                             |                                        | $S_{110}^{1\bar{1}0}$              | —                                                 | —                                                            | 26*  |

\* Приведены данные по  $\Gamma/f^2$  в дБ/(мкс·ГГц<sup>2</sup>).\*\* Приведены данные по  $\Gamma/f^2$  в дБ/(мкс·МГц<sup>2</sup>).



Таблица 7.26. Затухание релеевских поверхностных волн в кристаллах

| Кристалл            | Срез (плоскость) | Направление распространения | $\Gamma$ , дБ/мкс ( $f$ , ГГц) | $\alpha$ , $10^2$ дБ/м, на частоте, ГГц [233, 234, 331] |       |       |       |
|---------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                     |                  |                             |                                | 0,1                                                     | 0,2   | 0,4   | 1     |
| Арсенид галлия      | 211              | 111                         | 3,62 (1) [248]                 | —                                                       | —     | —     | —     |
|                     | 110              | 100                         | 4,22 (1) [135]                 | —                                                       | —     | —     | —     |
|                     | 001*             | 110                         | 12,8 (1) [135]                 | —                                                       | —     | —     | —     |
| Банан               | Y*               | 001                         | 3,7 (1) [135]                  | —                                                       | —     | —     | —     |
| Германат висмута    | 001*             | 110                         | 1,64 (1) [248]                 | 0,199                                                   | 0,571 | 1,832 | 9,756 |
|                     | 111              | 110                         | 1,64 (1) [248]                 | —                                                       | —     | —     | —     |
|                     | 111              | 110                         | —                              | 0,199                                                   | 0,571 | 1,832 | 9,756 |
| Иодат лития         | Z                | Любое                       | 450 (1) [135]                  | —                                                       | —     | —     | —     |
| Кварц               | Y**              | 100                         | 0,41 (0,316) [332]             | —                                                       | —     | —     | —     |
|                     |                  |                             | 4,1 (1,047) [332]              | 0,211                                                   | 0,558 | 1,661 | 8,244 |
|                     |                  |                             | 2,6 (1) [248]                  | —                                                       | —     | —     | 8,220 |
|                     | ST               | 100                         | 3,09 (1) [248]                 | 0,232                                                   | 0,630 | 1,897 | 9,733 |
| Ниобат лития        | X                | 001                         | 1,1—1,78 (0,9) [332]           | 0,079                                                   | 0,210 | 0,621 | 3,06  |
|                     | Y                | 100                         | 3,84 (1,95) [332]              | —                                                       | —     | —     | 3,04  |
|                     | Y***             | 001                         | 0,93 (1) [227]                 | —                                                       | —     | —     | —     |
|                     | Y***             | 001                         | 1,07 (1) [227]                 | —                                                       | —     | —     | —     |
|                     | Y + 16,5°        | 100                         | —                              | 0,086                                                   | 0,227 | 0,669 | 3,28  |
|                     | Y + 41,5°        | 100                         | —                              | 0,093                                                   | 0,225 | 0,600 | 2,62  |
|                     | Z - 41,5°        | 100                         | 1,05 (1) [227]                 | —                                                       | —     | —     | —     |
| Молибдат свинца     | X                | 010                         | 7,5 (1) [135]                  | —                                                       | —     | —     | —     |
| Оксид цинка         | Z                | Любое                       | 37 (1) [135]                   | —                                                       | —     | —     | —     |
| Пьезокерамика PZT-4 | —                | Любое                       | 6 (0,036) [135]                | —                                                       | —     | —     | —     |
| Танталат лития      | Z                | 010                         | 1,0 (1) [135]                  | 0,092                                                   | 0,230 | 0,646 | 3,004 |
|                     | Y                | 001                         | 1,14 (1) [135]                 | —                                                       | —     | —     | —     |

\*  $\Gamma = 1,45f^{1,9} + 0,19f$  [135].

\*\*  $\Gamma = 2,15f^{1,9} + 0,45f$  [135].

\*\*\*  $\Gamma = 0,88f^{1,9} + 0,19f$  [135].

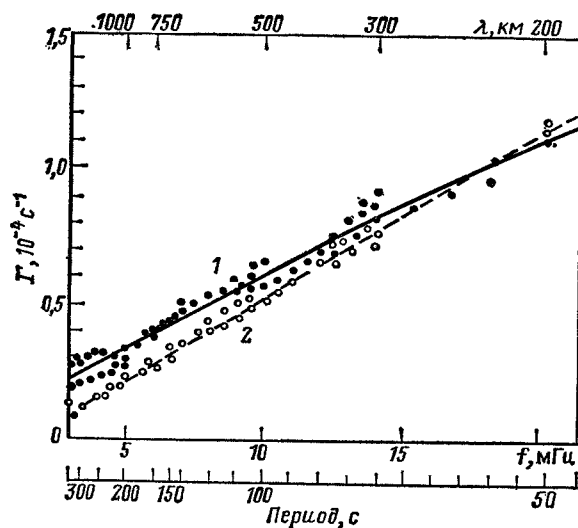


Рис. 7.33. Добротность продольных колебаний алюминиевых стержней в зависимости от частоты [259]

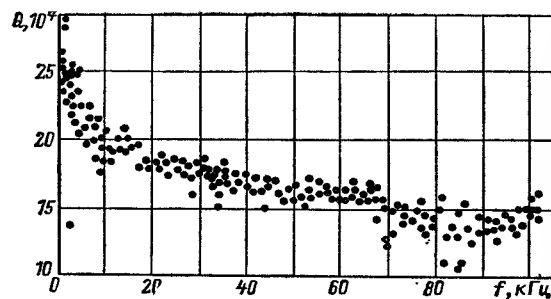


Рис. 7.32. Коэффициент затухания  $\Gamma$  сейсмических волн Лява (1) и релеевских волн (2) в зависимости от периода (частоты, длины волны). Данные получены после обработки записей серии землетрясений [252]

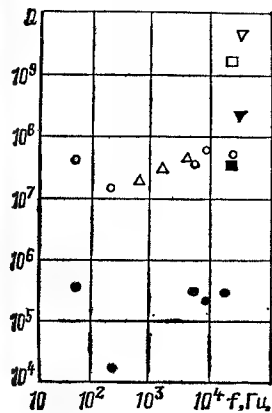


Рис. 7.34. Добротность низкочастотных резонаторов из различных материалов:

○ — алюминиевый сплав (Al-5056); △ — Nb [269]; □ — Si [270]; ▽ —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [271]. Темные значки —  $T=300$  К, светлые —  $T=4,2$  К

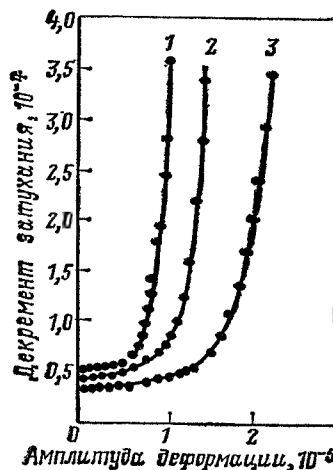


Рис. 7.35. Амплитудно-зависимое затухание в алюминии при  $t=84^\circ\text{C}$ :

1 — неотожженный образец; 2 — отжиг (время возврата 3,5 ч); 3 — отжиг (13,5 ч) [272]

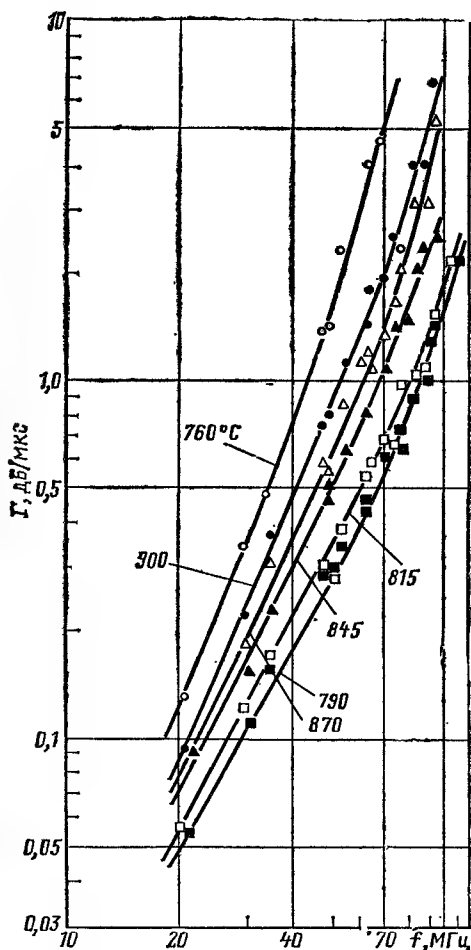


Рис. 7.36. Затухание продольных волн в закаленной штампованной стали (образцы аустенизированы при различной указанной температуре) [273]

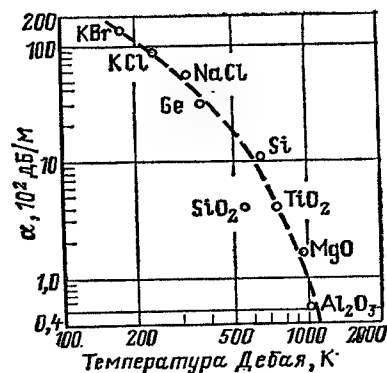


Рис. 7.37. Коэффициент затухания продольных волн (1 ГГц) при  $T=300$  К как функция температуры Дебая.

Направление распространения  $L$ -волны: кубические кристаллы — [100],  $\text{SiO}_2$  — X;  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — с [319]

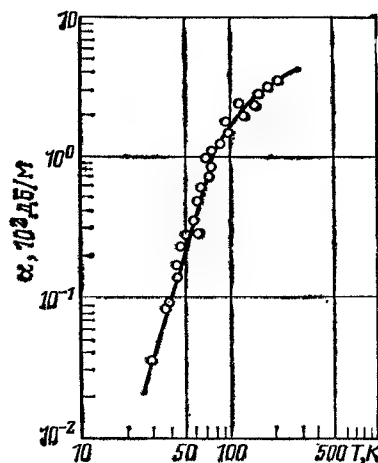


Рис. 7.38. Зависимость затухания в кристалле  $\text{MgO}$  от температуры ( $S_{100}$ -волна, 3 ГГц) [319]

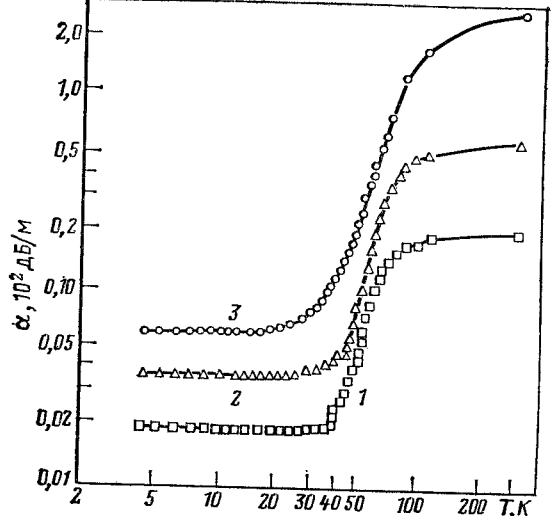


Рис. 7.39. Зависимость затухания звука на частоте 1 ГГц в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от температуры для волн, распространяющихся вдоль оси  $a$ : 1 — продольная; 2, 3 — быстрая и медленная поперечные волны [320]

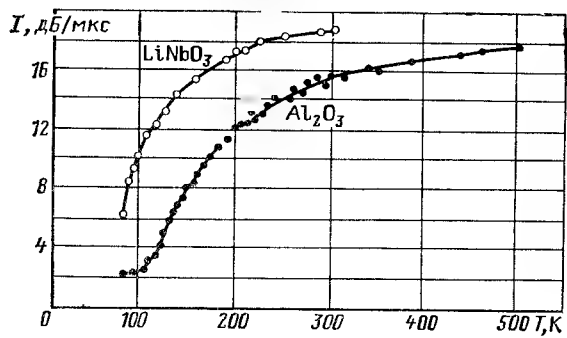


Рис. 7.40. Затухание  $L$ -волны вдоль тригональной оси кристаллов рубина и ниобата лития (9,4 ГГц) [321]

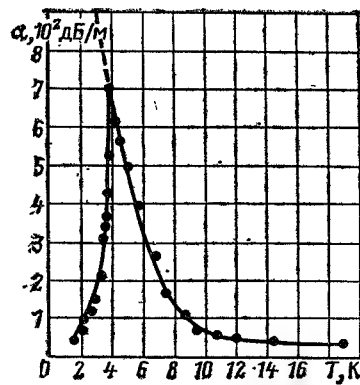


Рис. 7.42. Поглощение  $L$ -волны (10,3 МГц) в чистом олове в области перехода в сверхпроводящее состояние: пунктир — поглощение в нормальном состоянии [323]

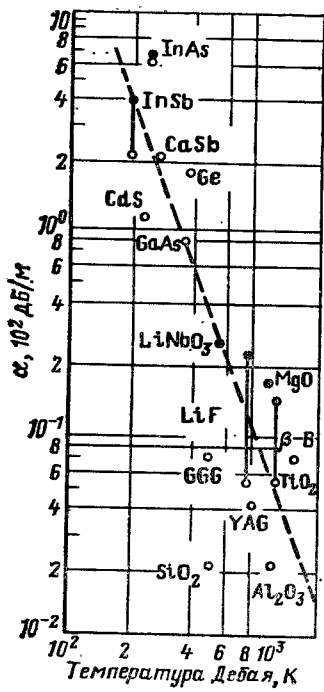


Рис. 7.41. Остаточное поглощение (1 ГГц) в зависимости от температуры Дебая [322]: ○ —  $L$ -волн; ● —  $S$ -волн

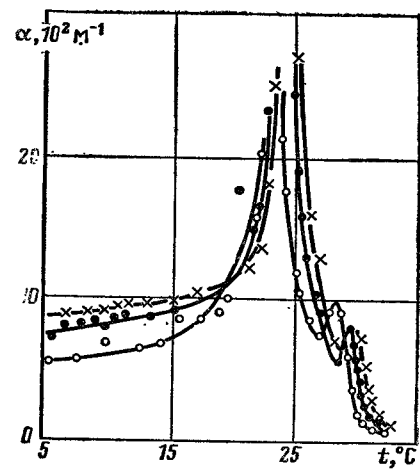


Рис. 7.43. Поглощение  $L$ -волны (10 МГц) вдоль оси  $c$  кристалла сульфонида сурьмы при различном сопротивлении образца [324]: ○ —  $10^{-9}$  Ом; ● —  $2 \cdot 10^{-9}$  Ом; x —  $3 \cdot 10^{-9}$  Ом [324]

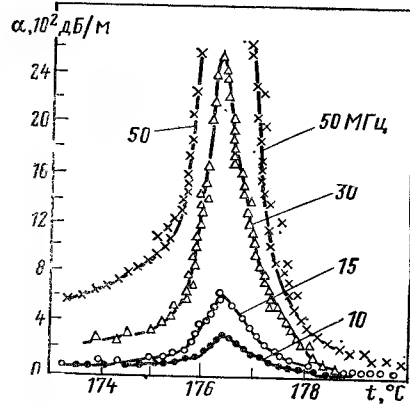


Рис. 7.44. Зависимость от температуры коэффициента поглощения  $L$ -волны вдоль оси  $Y$  в германате свинца [325]

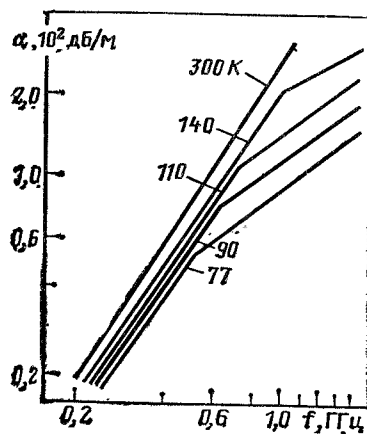


Рис. 7.47. Частотная зависимость поглощения  $SS_{110}$ -волны в  $n$ -кремнии. Излом соответствует переходу от затухания Ахизера к затуханию Ландау-Румера [328]

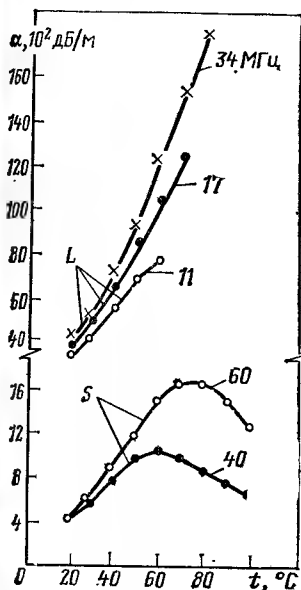


Рис. 7.45. Затухание пьезоактивных сдвиговых ( $S$ ) и продольных ( $L$ ) волн в иодате лития,  $S \perp c, L \parallel c$  [326] (см. также [327])

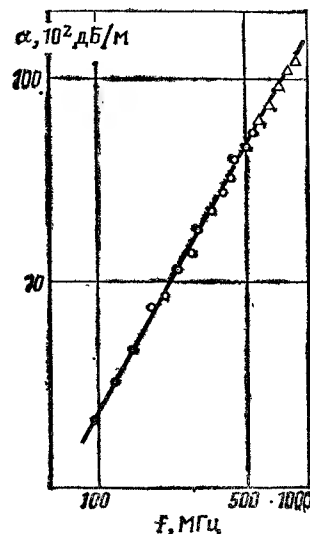


Рис. 7.48. Частотная зависимость затухания  $SS_{110}$ -волны в парателлурите ( $\alpha = \alpha_0 f^{1.9}$ , где  $\alpha_0 = 3.6 \cdot 10^{-2}$  дБ/м,  $f$  в МГц;  $t = 18^\circ\text{C}$ ) [329]

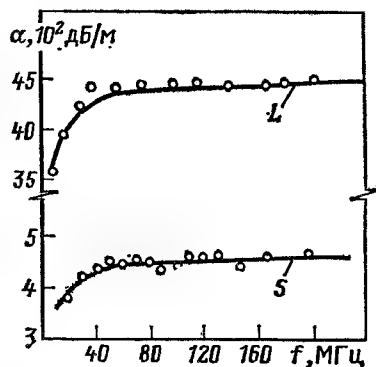


Рис. 7.46. Затухание при  $t = 20^\circ\text{C}$  пьезоактивных сдвиговых и продольных волн в иодате лития [326]

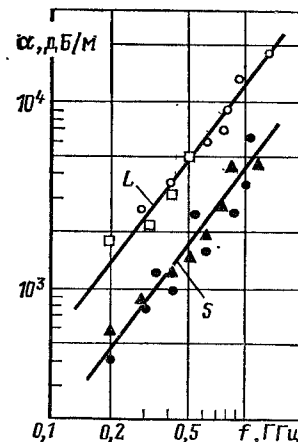


Рис. 7.49. Неэлектронное затухание  $L$ - и  $S$ -волн в сульфиде кадмия при 300 К. Волны распространяются под разным углом к оси  $c$ :  $\circ, \square$  —  $40^\circ$ ;  $\bullet$  —  $0^\circ$ ;  $\blacktriangle$  —  $90^\circ$  [330]

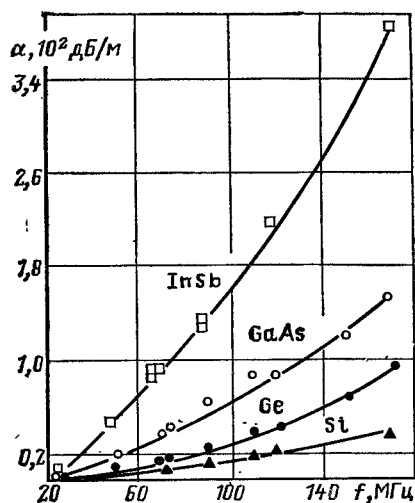


Рис. 7.50. Частотная зависимость поглощения в кремнии, германии, арсениде галлия, антимониде индия при 300 К  $L_{110}$ -волны. Концентрация примесей в Si и Ge:  $10^{14}$  см $^{-3}$  As; в GaAs:  $3 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$  Te, в InSb:  $2 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  Te [160]

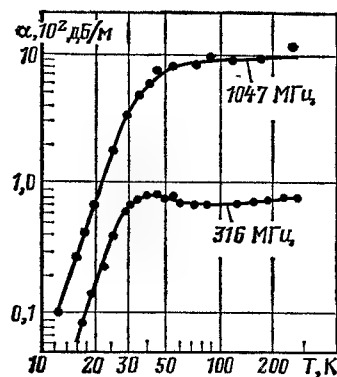


Рис. 7.51. Поглощение поверхностной волны на Y-срезе кварца на разной частоте (волны распространяются в направлении [100] [333])

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1985.
2. Eder F. X.//Mod. Messmethoden Phys. 1960. Bd 1; Petrallia S.//Nouvo cimento Supp. 1952. Vol. 9. P. 1—12.
3. Blythe A. R.//Acoustica. 1965—1966. Vol. 16. P. 118—121.
4. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем./Под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. М.: Изд-во иностр. лит. 1956.
5. Kneser H. O.//Ergeb. Exakt. Naturwiss. 1949. Bd 22. S. 121—127; Nomoto O. Ultrasonic waves. Tokyo. 1940; Petrallia S.//Nuovo cimento. 1951. Vol. 9. P. 1—8.
6. Hardy H. C., Telfair D., Pielemeier W. H.//J. Acoust. Soc. Amer. 1942. Vol. 14. P. 226—232; Pielemeier W. H., Hardy H. C.//Ibid. 1941. Vol. 13. P. 80—84.
7. Penman H. L.//Proc. Phys. Soc. 1935. Vol. 47. P. 543—548.
8. Quigley Th. H.//Phys. Rev. 1946. Vol. 67. P. 298—302.
9. Sherratt G. G., Griffiths E.//Proc. Roy. Soc. 1934. Ser. A. Vol. 147. P. 292—297.
10. Overbeck C. J., Kendall H. C. //J. Acoust. Soc. Amer. 1941. Vol. 13. P. 26—31.
11. Бачинский А. И., Путилов В. В., Суворов Н. П. Справочник по физике. М.: Учпедгиз. 1951.
12. Beyer R. T.//J. Acoust. Soc. Amer. 1951. Vol. 23. P. 176—181.
13. Hodge A. H.//J. Chem. Phys. 1937. Vol. 5. P. 974—977.
14. Волярович М. П., Балашова Д. Б.//Применение ультразвука для исследования веществ. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 13. С. 63—68.
15. Henderson M. C., Peselnick L.//J. Acoust. Soc. Amer. 1957. Vol. 29. P. 1074—1078.
16. Meyer E., Sessler G.//Z. Phys. 1957. Bd. 149. S. 15—20.
17. Itterbeek A., Mariens P.//Physica. 1937. Vol. 4. P. 609—615.
18. Keller H. H.//Z. Phys. 1940. Bd 41. S. 386—392.
19. Вайтонис В. В., Яковлев В. Ф.//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 296—301.
20. Itterbeek A., Mariens P.//Physica. 1938. Vol. 5. P. 1533—1537; Vol. 7. P. 938—942, 909—913, 125—127; Itterbeek A., Thys L.//Physica, 1938. Vol. 5, P. 889—892, 298—302, 640—642.
21. Красишкин П. Е.//Докл. АН СССР. 1940. Т. 27. С. 214—217; Phys. Rev. 1944. Vol. 65. P. 190—193.
22. Мединков Е. П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР. 1963.
23. Evans E. J., Bazley E. N.//Acoustica. 1956. Vol. 6, P. 238—241; Pohlmann W.//Proc. 3th Intern. Congr. Comm. Acoustics. Stuttgart. 1959. Vol. 1. P. 532—537.
24. Sivlan L. J.//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol. 19. P. 914—919.
25. Liepmann H. W.//Helv. Acta. 1938. Bd 11. S. 381—384; 1939. Bd 12. S. 421—425.
26. Gupill E. W., Hoyt C. K., Robinson D. K.//Canad. J. Phys. 1955. Vol. 33. P. 397—402.
27. Beyer R. T.//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 788—793.
28. Pitt A., Jackson W. J.//Canad. J. Phys. 1935. Vol. 12. P. 686—690.

29. Itterbeek A., Forrez G., Teirlinck M.//Physica. 1957. Vol. 23. P. 905—908.
30. Findley J. C., Pitt A., Grayson S. H. e. a.//Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 506—508; 1939. Vol. 56. P. 122—125; Chase C. E.//Proc. Roy. Soc. 1953. Vol. A220. P. 116—120.
31. Pellam J. R., Squire C. F.//Phys. Rev. 1947. Vol. 72. P. 1245—1249; 1947. Vol. 71. P. 477—481.
32. Пешков В. П.//Докл. АН СССР. 1944. Т. 45. С. 385—388; Лившиц Е. М., Пешков В. П. Там же. 1945. Т. 47. С. 117—121.
33. Михайлов И. Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М.: Гостехиздат. 1949.
34. Galt J. K.//J. Chem. Phys. 1948. Vol. 16. P. 505—509.
35. Noury J., Lacam A.//J. Phys. Rad. 1954. Vol. 15. P. 301—304.
36. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue serie. Gruppe II. Bd 5. Molecularakustik. W. Schaffs, Heidelberg: Springer-Verlag. 1967.
37. Parthasarathy S.//Proc. Ind. Acad. Sci. 1935. Vol. A2. P. 497—500; Vol. A3. P. 285—287, 482—485, 519—520, 544—546; 1936. Vol. A4. P. 59—62, 213—217; Current Sci. 1937. Vol. 6. P. 213—215.
38. Schaffs W.//Z. Phys. 1939. Bd 114. S. 110—115; Z. Phys Chem. 1944. Bd 194. S. 28—32; Z. Naturforsch. 1948. Bd 3. S. 396—401; Z. Phys. Chem. 1951. Bd 196. S. 397—402.
39. Freyer E., Hubburd J. C., Andrews D.//J. Amer. Soc. 1929. Vol. 51. P. 759—767.
40. Schaffs W., Nutsch-Kuhnckles R.//Acoustica. 1965—1966. Vol. 10. P. 66—69.
41. Lagemann R. T., Millan D. R., Woolf W. E.//J. Chem. Phys. 1949. Vol. 17. P. 369—373.
42. Willard G. W.//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol. 19. P. 438—443.
43. Greenspan M., Tschiegg C.//Ibid. 1959. Vol. 31. P. 75—80.
44. Zeifen N.//Z. Phys. 1938. Bd 108. S. 681—687.
45. Lagemann R. T., McMillan D. R., Woosley M.//J. Chem. Phys. 1948. Vol. 16. P. 247—249.
46. Baccaredda M., Giacomini A.//Ricerca Sci. 1964. Vol. 16. P. 611—613; Att. Acad. Naz. Lincei. 1946. Vol. I. P. 401—405.
47. Цветков В., Маринин В.//Докл. АН СССР. 1949. Т. 68. С. 49—52.
48. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во ЛГУ. 1980.
49. Seifen N.//Z. Phys. 1938. Bd 108. S. 681—686.
50. Weissler A.//J. Chem. Soc. Amer. 1948. Vol. 70. P. 1634—1639.
51. Kuhnckles R., Schaffs W.//Acoustica. 1963. Vol. 13. P. 407—411.
52. Papcholy M., Paude A., Parthasarathy S.//J. Sci. Ind Res. 1944. Vol. 3. P. 5—10, 111—114, 159—162, 263—264, 354—357.
53. Бражников Н. И. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества. Ультразвуковые методы/Под ред. Н. Н. Шумиловского. М.—Л.: Энергия. 1965.
54. Wilson W. D.//J. Acoust. Soc. Amer. 1951. Vol. 23. P. 1067—1072; Секоян С. С.//Измерительная техника. 1963. № 4. С. 51—55; Del Grosso V. A., Mader C. W.//J. Acoust. Soc. Amer. 1972. Vol. 52. P. 1442—1446. Илгунас В., Яронис Э., Сукацкас В. Ультразвуковые интерферометры. Вильнюс: Мокслис. 1983.
55. Seemann H. J., Klein F. K.//Z. Angew. Phys. 1965. Bd 19. S. 368—372.
56. Вьюгов П. Н., Гумениок В. С.//Укр. физ. журн. 1966. Т. 11. С. 440—445.
57. Bockris O. M., Richards N. E.//Proc. Roy. Soc. 1957. Vol. A241. P. 44—51.
58. Ходов З. Л.//Физ. металлов и металловедение. 1960. Т. 10. С. 722—725.
59. Веббер Дж., Стефенс Р. Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона; Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, В. А. Шутилова. М.: Мир. 1970. Т. IV. Ч. Б.
60. Клеппа О. J.//J. Chem. Phys. 1950. Vol. 18. P. 1331—1335.
61. Гитис М. Б., Михайлов И. Г.//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 145—159.
62. Пронин Л. А., Филиппов С. И.//Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1963. Т. 5. С. 10—14.
63. Илгунас В. И., Яронис Э. П.//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 145—149.
64. Abowitz G., Gordon R. B.//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 37. P. 125—129.
65. Barmatz M., Rudnick I.//Phys. Rev. 1968. Vol. 170. P. 224—228.
66. Трелин Ю. С., Васильев И. В.//Применение ультразвуки к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 13. С. 3—10.
67. Gordon R. B.//Acta Met. 1959. Vol. 7. P. 1—8.
68. Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.//Вопросы физики металлов. 1955. Т. 6. С. 70—74.
69. Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 184—187.
70. Hubbard J. S., Loomis A. L.//Phyl. Mag. 1928. Vol. 5. P. 1177—1184.
71. Kleppa O. Y. J. Chem. Phys. 1949. Vol. 17. P. 668—672.
72. Jarzinski J.//Proc. Phys. Soc. 1963. Vol. 81. P. 745—749.
73. Пронин Л. А., Филиппов С. И.//Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1963. Т. 11. С. 11—17; Казаков Н. Б., Пронин Л. А., Филиппов С. И.//Там же. 1964. Т. 12. С. 11—16.
74. Plass K. G.//Acoustica. 1963. Vol. 13. P. 240—244; Akust. Beih. 1963. Bd 13. S. 240—246.
75. Hunter J. L., Hovan K. S.//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 41. P. 4013—4016; J. Acoust. Soc. Amer. 1964. Vol. 36. P. 1040—1043; Hunter J. L., Welch T. J., Montrose C. J.//J. Acoust. Soc. Amer. 1963. Vol. 35. P. 1568—1572.
76. Отпущенников Н. Ф., Сысоев И. В.//Доклады I Всесоюзного симпозиума по акустооптической спектроскопии. Ташкент: ФАН, 1976. С. 109—113.
77. Wilson W., Bradlay D.//J. Acoust. Soc. Amer. 1964. Vol. 36. P. 333—338.
78. Hawley S., Allegra J., Holton Y.//J. Acoust. Soc. Amer. 1970. Vol. 47. P. 258—264.
79. Авгибаев Б., Икрамов Ш. Х., Шин И. Б.//Доклады I Всесоюзного симпозиума по акустооптической спектроскопии. Ташкент: ФАН. 1976. С. 148—151.
80. Smith A. H., Lawson A. W.//J. Chem. Phys. 1954. Vol. 22. P. 351—356.
81. Hunter J. L., Dardy H. D., Bucaro J. A.//Preprint ND26. Congress Intern. Acoust. Liege. 1965. P. 165—167.
82. Pyro J. F., Edmonds P. D.//Mol. Cryst. Lig. Cryst. 1974. Vol. 25. P. 175—177.
83. Wetsel G. C., Speer R. S., Lowry B. A. e. a.//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 1495—1498.
84. Miyano K., Ketterson J. B. Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 34. P. 1047—1052.
85. Miyano K., Ketterson J. B.//Phys. Rev. 1975. Vol. A12. P. 615—619.
86. Walsh J. M., Rice M. H.//J. Chem. Phys. 1957. Vol. 26. P. 815—819.
87. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М.: Физматгиз. 1966; Гунь-Сю-Фэн, Зарембо Л. К., Красильников В. А.//Акуст. журн. 1963. Т. 9. С. 382.

88. Beyer R. T., Coppens A. B.//Proc. 5th Intern. Comm. Acoust. Congr. Liege. 1965. P. 515—516.
89. Swamy K. M., Narayan K. L., Swamy P. S.//Acoustica. 1975. Vol. 32. P. 339—342.
90. Шкловская-Корди В. В.//Акуст. журн. 1963. Т. 9. С. 107—110.
91. Михайлов И. Г. Шутилов В. А.//Там же 1960. Т. 6. С. 340—343.
92. Emery J., Kamtoun C.//C. R. Acad. Sci. (Paris). 1976. Vol. 283. P. 131—134.
93. Adler L., Niedemann E. A.//J. Acoust. Soc. Amer. 1962. Vol. 34. P. 410—415.
94. Зверев В. А., Калачев А. И.//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 321—325.
95. Swamy K. M., Narayan K. L., Swamy P. S.//Acoustica. 1976. Vol. 34. P. 48—51.
96. Thakur K. P.//Ibid. 1976. Vol. 39. P. 270—272.
97. Hagelberg M. P., Holton G., Kao S.//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 41. P. 564—568.
98. Markham J., Beyer R., Lindsay R. B.//Rev. Mod. Phys. 1951. Vol. 23. P. 353—359.
99. Thorp W. H.//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 42. P. 272—275.
100. Lacam A., Nairy J.//J. Phys. Rad. 1953. Vol. 14. P. 272—275.
101. Heaseall L., Lamb J.//Proc. Phys. Soc. 1956. Vol. 69. P. 869—873.
102. Mallikarjuna Rao S. P., Suryanarayana M.//Ind. J. Pure and Appl. Phys. 1973. Vol. 11. P. 824—829.
103. Pellam J. R., Galt J. K.//J. Chem. Phys. 1946. Vol. 14. P. 608—613.
104. Бердыев А. А.//Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн. 1965. № 3. С. 16—21; Бердыев А. А., Лежнев Н. Б.//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 247—250.
105. Парниев К., Хабибулаев П. К., Халиулин М. Г.//Там же 1969. Т. 15. С. 466—468.
106. Hunter J. L.//J. Acoust. Soc. Amer. 1941. Vol. 13. P. 36—41.
107. Sette D.//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 1337—1341.
108. Бажулин П. А.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1938. Т. 8. С. 457—460.
109. Lamb J., Pinkerton M. M.//Proc. Roy. Soc. 1949. Vol. 199. P. 114—120.
110. Nomoto O., Kishimoto T., Ikeda T.//Bull. Kobayasi Inst. Phys. Res. 1952. Vol. 2. P. 72—78.
111. Pinkerton M. M.//Proc. Phys. Soc. 1949. Vol. 62. P. 129—133.
112. Lawley L. E., Reed R. D.//Acoustica. 1955. Vol. 5. P. 316—320.
113. Matthias B. T.//Nature. 1948. Vol. 161. P. 325.
114. Pancholy M., Parthasarathy S., Chapgar A. F.//Nuovo Cimento. 1958. Vol. 10. P. 111—116.
115. Andreae J. H., Lamb J.//Proc. Phys. Soc. 1951. Vol. B64. P. 1021—1026; Rapiano R. A.//Phys. Rev. 1947. Vol. (2) 72. P. 78—83.
116. Давидович Л. А., Иванов А. А., Махкамов С. И. и др.//Акуст. журн. 1973. Т. 19. С. 26—31.
117. Шорошев Ю. Г., Лаишина Л. В., Шахпоронов М. И.//Докл. АН СССР. 1967. Т. 173. С. 70—72.
118. Махкамов С. И., Хабибулаев П. К., Халиулин М. Г.//Акуст. журн. 1974. Т. 20. С. 643—644.
119. Chase C. E.//Proc. Roy. Soc. 1953. Vol. A220. P. 116—121; Phys. Fluids. 1958. Vol. 1. P. 193—197.
120. Fox F. E., Rock G. D.//Phys. Rev. 1946. Vol. 2. P. 68—73; Smith M. C., Beyer R. T.//1948. Vol. 27. P. 654—658; Pinkerton J. M. M.//Nature. 1947. Vol. 1960. P. 128.
121. Кошкин Н. И.//Применение ультразвуки к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1955. Вып. 1. С. 101—146.
122. Fox F. E., Wallace W.//J. Acoust. Soc. Amer. 1954. Vol. 26. P. 994—1001.
123. Towle D. M., Lindsay R. B.//J. Acoust. Soc. Amer. 1955. Vol. 27. P. 530—534.
124. Зарембо Л. К., Красильников В. А., Шкловская-Корди В. В.//Докл. АН СССР. 1956. Т. 109. С. 731—734.
125. Зарембо Л. К. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ. 1958.
126. Narasimhan V., Beyer R. T.//J. Acoust. Soc. Amer. 1956. Vol. 28. P. 1233—1234.
127. Наугольных К. А., Романенко Е. В.//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 200—204.
128. Birch E.//Earth Today/Ed. T. F. Gaskell, A. H. Cook. N.-Y. 1961. P. 295.
129. Salalanu C.//C. R. Acad. Sci. 1961. Vol. 252. S. 3021—3025.
130. Overton W. C.//J. Chem. Phys. 1950. Vol. 18. P. 113—118.
131. Winder D. R., Smith C. S.//Phys. Chem. Solids. 1958. Vol. 4. P. 128—133.
132. Беранек Л. Акустические измерения: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1952.
133. Белянин В. А., Новиков И. И., Проскурии В. Б.//Тр. IX Всесоюзной акустической конференции. Вып. 2. С. 107—110.
134. Отпущенников Н. Ф.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1952. Т. 22. С. 782—786; Кузьменко В. А.//Применение ультразвуковых колебаний для исследования свойств, контроля качества и обработки металлов и сплавов. Киев: Изд-во АН УССР. 1960. С. 79—85.
135. Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь. 1981.
136. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М.: Физматгиз. 1960.
137. Иванов В. Б. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛЭТИ. 1971.
138. Auberger M., Reinehart J. S.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 219—221.
139. Bacher K.//Verh. Deutsch. Phys. Ges. 1939. Bd. 3. S. 68—72; J. Erdol und Kohle. 1949. Bd. 2. S. 125—127; Воларович М. П., Баяк Е. И.//Применение ультразвуки к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 11.
140. Мартынов Е. Г., Матвеев А. К.//Там же. 1960. Вып. 10. С. 147—152.
141. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела: Пер. с англ./Под ред. И. Г. Михайлова, В. В. Леманова. М.: Мир. 1972. С. 307.
142. Дричко И. Л., Илисовский Ю. В., Гальперин Ю. М.//Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 2463—2466.
143. McSkimin H. J., Andreatch P. Jr.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 3312—3315.
144. Меркулов Л. Г.//Акуст. журн. 1959. Т. 5. С. 432—437.
145. Papadakis E. P.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 2168—2172.
146. Chatak S. K., Sinha S. K.//Indian J. Phys. 1974. Vol. 48. P. 66—74.
147. Meitzler A. H.//Ultrasonic Transducer Materials/Ed. O. E. Mattiat. N.-Y.: Plenum Press. 1971.
148. Kor K. S., Tandon U. S., Mishra P. K.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 2396—2399.
149. Vallin J., Marklund K., Sikstrom J. O.//Arkiv for Pysik. 1966. Bd 33. S. 345—351.
150. Dixon R. W.//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3634—3639.
151. Ушида Н. С., Ниидзеки Л. Н.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1973. Т. 61. С. 21—32.

152. Lee B. H.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2984—2988.
153. Лемаиов В. В., Авдонин В. Я., Павленко А. В.//Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 2635—2639.
154. Beattie A. G., Samara G. A.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 2376—2378.
155. Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона, Р. Терстона: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Фабелинского. М.: Мир. 1973. Т. 6.
156. Байрамов Б. Х., Захарченя Б. П., Писарев Р. В. и др.//Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 3366—3370.
157. Melngailis J., Vetelino J. F., Jhunjunwala A. e. a.//Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 32. P. 203—207.
158. Север Г. А., Баранский К. Н.//Изв. АН СССР. Сер. физ., 1971. Т. 35. С. 935—939.
159. Анисимкин В. И., Земляничин М. А., Морозов А. И.//Физика твердого тела. 1975. Т. 17. С. 1513—1517.
160. Красильников О. М., Векилов Ю. Х., Кадышев А. Е.//Там же. 1969. Т. 11. С. 1200—1207.
161. Alton W. J., Barlow A. J.//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023—3027.
162. Spencer E. G., Denton R. T.//Ibid. 1963. Vol. 34. P. 3059—3064; Belt R. F.//Laser Focus. 1970. Vol. 6. P. 44—46.
163. Bateman T. B.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2194—2201.
164. Clark A. E., Strakna R. E.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 1172—1177.
165. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue Serie, Bd 7. Kristallstrukturdaten anorganischer Verbindungen. Berlin. Springer Verlag. 1971.
166. Беляев Л. М., Витовский Б. В., Добржанский Г. Ф.//Рост кристаллов. М.: Изд-во АН СССР. 1957. Т. 1. С. 249—257; Тырбу И. А., Ульянов В. Л., Ботани А. А.//Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 3389—3394.
167. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука. 1965.
168. Pratt R. G., Simpson G., Grossley W. A.//Electron. Lett. 1972. Vol. 8. P. 127.
169. Cottlieb M., Isaaks T. J., Feichtner J. D. e. a.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 5145—5150; Isaaks T. J., Cottlieb M., Daniel M. e. a.//J. Electr. Mat. 1975. Vol. 4. P. 67—73.
170. Yano T., Nabeta J., Watanabe A.//Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. P. 570—571.
171. Warner A. W., Pinkow D. A.//J. Acoust. Soc. Am. 1970. Vol. 47. P. 791—797.
172. Bateman T. B.//Ibid. 1962. Vol. 33. P. 3309—3317.
173. Cline C. F., Dunegan H. L., Henderson G. W.//Ibid. 1967. Vol. 38. P. 1944—1952.
174. McFee J. H.//Ibid. 1963. Vol. 34. P. 1548—1557; Hutson A. R.//Phys. Rev. Lett. 1960. Vol. 4. P. 505—507.
175. Федотов И. И., Кузнецов В. Н.//Применение ультразвуки к исследованию веществ. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 14. С. 269—275.
176. Александров К. С., Аннстратов А. Т., Рез И. С. и др.//Физика твердого тела. 1977. Т. 19. С. 1863—1868.
177. Сильвестрова И. М., Барта Ч., Добржанский Г. Ф. и др.//Кристаллография. 1975. Т. 20. С. 1062—1068.
178. Pinnow D. A., Van Uitert L. G., Warner A. W. e. a.//Appl. Phys. Lett. 1969. Vol. 15. P. 83—85.
179. Бадиков В. В., Богданов С. В., Годовиков А. А. и др.//Акуст. журн. 1971. Т. 17. С. 300—305.
180. Можайский В. Н.//Приборы и техн. эксперим. 1974. Т. 2. С. 200—206.
181. Dieulesaint E., Royer D. Ondes elastiques dans les solides. Application au traitement du signal/Ed. Masson, Paris. 1974.
182. Coquin G. A., Pinnow D. A., Warner A. W.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 2163—2168.
183. Lange J. N.//Phys. Rev. 1968. Vol. 176. P. 1030—1035.
184. Kleszczewski Z.//Archiwum Akustyki. 1978. Vol. 13. P. 235—241.
185. Ohmachi C., Uchida N.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2307—2313.
186. Dutoit M.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics 1973. Vol. SU-20. P. 279—288.
187. Сосов Ю. М., Юшин Н. К., Кудзин А. Ю.//Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 475—477.
188. Писаревский Ю. В., Пополитов В. И., Сильвестрова И. М. и др.//Материалы XII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов. 1983. Ч. II. С. 363—364.
189. Бондаренко В. С., Гавриляченко В. Г., Чкалова В. В. и др.//Науч. тр. вузов ЛитССР. Ультразвук. 1977. Т. 9. С. 105—111.
190. Ohmachi C., Uchida N.//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 3583—3589.
191. Луданов А. Г., Фотченков А. А., Яковлев Л. А.//Акуст. журн. 1976. Т. 22. С. 612—617.
192. Зобнин О. П., Яковлев Л. А.//Там же. 1976. Т. 22. С. 234—239.
193. Weidner D.//Geophys. Rev. Lett. 1975. Vol. 2. P. 189—191.
194. Заграй Н. П., Максимов В. Н.//Прикладная акустика, Таганрог: Изд. ТРТИ. 1975. Вып. 1. С. 187—192.
195. Аникеев Д. И., Зарембо Л. К., Карпачев С. Н.//Физика твердого тела. 1982. Т. 24. С. 2938—2941.
196. Левитес А. Ф., Минаева К. А., Струков Б. А. и др.//Приборы и техн. эксперим. 1974. № 5. С. 187—194.
197. Sapriel J.//Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 19. P. 533—535.
198. Spenser E. G., Lenzo P. V.//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 423—428.
199. Smith R. T., Welsh F. S.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 15—15.
200. Чкалова В. В., Бондаренко В. С., Ключев В. П. и др.//Электронная техника. Сер. 14. 1968. Вып. 4. С. 158—164.
201. Кудзин В. В.//Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 651—656.
202. Ложнев Н. Б., Карабаш В. И.//Материалы XI Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Душанбе. 1981. Ч. II. С. 79—80.
203. Бараиский К. Н., Бердыев А. А., Писаревский Ю. В. и др.//Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн. 1975. № 1. С. 37—44.
204. Carleton H. R., Soref R. A.//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 109—112.
205. Ultrasonic Transducer Materials/Ed. O.E. Mattiat. N. Y.: Plenum Press. 1971.
206. Родриг Г. П.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С. 1613—1623.
207. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н.//Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
208. Дьяков А. М., Илизавский Ю. В., Фарбштейн И. И. и др.//Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 564—566.
209. Bajak I. L.//2 pracochna konferencia s. fyzikow, Bratislava. 1971. S. 184—185.
210. Warner A. W., Coquin G. A., Fink J. L.//Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 4353—4358.
211. Моисеева Н. А., Сильвестрова И. М., Писаревский Ю. В. Акустические свойства кристаллов. Бифталат калия. Препринт ИКАН. М. 1977.
212. Беликова Г. С., Беляев Л. М., Головей М. И. и др.//Кристаллография. 1974. Т. 19. С. 566—573; Беликова Г. С., Писаревский Ю. В., Сильвестрова И. М.//Физ. и хим. тв. тела. 1973. Т. 3. С. 18—24.



213. Tokuro I., Itsuro I.//Japan J. Appl. Phys. 1976. Vol. 15. P. 1451—1457.
214. Gottlieb M.//Laser Focus. 1972. Vol. 8. P. 24—28.
215. Duderov N. G., Demianets L. N., Lobachev A. M. e. a.//J. Crystall Growth. 1978. Vol. 44. P. 483—489.
216. Andrews R. A.//IEEE J. Quant. Electron. 1970. Vol. QE. P. 68—77.
217. Epstein D. J., Herrick W. H., Turek R. F.//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 1491—1497.
218. Busch M., Toledano I. C., Torres J.//Opt. Commun. 1974. Vol. 10. P. 243—249.
219. Hochli U. T.//Phys. Rev. 1972. Vol. B6. P. 1814—1821.
220. Roland G. W.//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 21. P. 52—54.
221. Кунигелис В. Ф., Самулионис В. И.//Науч. тр. вузов ЛитССР. Ультразвук. 1972. Т. 14. С. 11—16.
222. Уайт Д. Л.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1970. Т. 58. С. 68—75.
223. Яковкин И. Б., Петров Д. В. Дифракция света на акустических поверхностных волнах. Новосибирск: Наука. 1979.
224. Pennury O., Lakin K. M. Proc. Ultrasonic Simp. Los. Angel. 1975. P. 478—479.
225. Сибаяма К., Яманури К., Сато Х. и др.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 27—29.
226. Левин М. Д., Лобанова Г. А., Пашин Н. С. и др.//Акуст. журн. 1975. Т. 21. С. 68—71.
227. Campbell J. J.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2797—2802; Nutson A. R., White D. L.//Ibid. 1962. Vol. 33. P. 40—49; Szabo E. L., Slobodnik A. J.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1973. Vol. SU-20. P. 240—252.
228. Microwave Acoustics Handbook/Ed. A. Slobodnik, E. D. Conway, N. Y.: Office of Aerospace Research United State Air Force. 1970. Vol. 1.
229. O'Connell R. M., Carr P. H.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1977. Vol. SU-24. P. 376—389.
230. Scott B. A., Ingebrigsten K. A., Tseng C. C.//Nat. Res. Bull. 1970. Vol. 5. P. 1045—1051.
231. Жаффе Н., Берлинкур Д. А.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С. 1552—1567; Namatsu S., Doi K., Takahashi M.//Japan J. Appl. Phys. 1972. Vol. 11. P. 816—821; Gupta S. N., Vatelino J. F., Lipson V. B. e. a.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 858—863.
232. Слободник А. Д.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 10—26.
233. Каринский С. С. Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах. М.: Сов. радио. 1975.
234. Яковкин И. Б., Пашин Н. С.//Тезисы докладов VIII Всесоюз. конф. по квантовой акустике и акустоэлектронике. Казань. 1974. С. 38—39.
235. Ingebrigsten K. A., Tonning A.//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 16—18.
236. Колдрен Л. А., Шоу Х. Дж.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 30—44.
237. Coquin G. A., Tiersten H. F.//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 41. P. 921—939.
238. Залесский В. В., Мельцер Я. Е., Стрёмовский Э. В.//Приборы и техн. эксперим. 1976, № 6. С. 107—112.
239. Kraut E. A., Tittman B. R., Graham L. J. e. a.//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17. P. 271—278; Melngailis J., Vatelino J. F., Jhunjunwala A. e. a.//Ibid. 1978. Vol. 32. P. 203—205.
240. Slobodnik A. J., Conway E. D.//Electron. Lett. 1970. Vol. 6. P. 171—173; Slobodnik A. J., Szabo T. L.//Electron. Lett. 1971. Vol. 7. P. 257—259.
241. Фарнел Дж.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона. М.: Мир. 1973. Т. 6. С. 139—158.
242. Simpson G.//Electron. Lett. 1973. Vol. 9. P. 21—24.
243. Bateman T. B., McSkimin H. J., Whelar K.//J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 544—551; Hutson A. R.//Phys. Rev. Lett. 1960. Vol. 4. P. 505—507; Кайно Г. С.//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 188—199.
244. Isaaks T. J., Weinert R. W.//J. Electron. Mat. 1976. Vol. 5. P. 13—18.
245. Molokhia N. H., Issa M. A.//Pramana. 1978. Vol. 11. P. 289—295.
246. Dieulesaint E., Royer D.//Piezoelectricite. 1976. Vol. 54. P. 180—185.
247. Schulz M. B., Holland M. G.//Component performance and systems applications of SAW device. Scotland. 1973. P. 1—10.
248. Rouvaen J. M., Bridox E., Waxin G. e. a.//J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49(4). P. 2306—2312.
249. Seavy M. H.//Solid State Comm. 1972. Vol. 10. P. 219—223.
250. Бережнов В. В., Преображенский В. Л., Экономов И. А. и др.//Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. С. 376—379.
251. Campbell J. J., Jones W. R.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1968. Vol. SU—15. P. 209—220.
252. Кнопов Л.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Фабеллинского. М.: Мир. 1968. Т. 3. Ч. Б.
253. Birch F., Bancroft D.//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1938. Vol. 28. P. 243—250.
254. Bruckshaw J., Mahanta P.//Petroleum (Lond.). 1954. Vol. 17. P. 14—19.
255. Knopoff L., Porter L. D.//J. Geophys. Res. 1963. Vol. 68. P. 6317—6325.
256. Peselnick L., Zietz I.//Geophys. 1959. Vol. 24. P. 285—291.
257. Born W. T.//Ibid. 1941. Vol. 6. P. 132—139.
258. Mason W. P., McSkimin H. H.//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol. 19. P. 466—475.
259. Zemanek J. Jr., Rudnick I.//Ibid. 1961. Vol. 33. P. 1283—1288.
260. Lucke K.//J. Appl. Phys. 1956. Vol. 27. P. 1433—1438.
261. Auberger M., Rinehart J. S.//Ibid. 1961. Vol. 32. P. 219—225.
262. Roth W.//Ibid. 1948. Vol. 19. P. 901—908.
263. Lindsay G.//Phys. Rev. 1914. Vol. 3. P. 397—405.
264. Wedel R. L., Walther H.//Phys. 1935, Vol. 6. P. 141—148.
265. Gemant A., Jackson W.//Phyl. Mag. 1937. Vol. 23. P. 960—971.
266. Kimball A. L., Lovell D. E.//Phys. Rev. 1927. Vol. 30. P. 948—956.
267. Papadakis E. P.//J. Acoust. Soc. Amer. 1965. Vol. 37. P. 711—718.
268. West F. G.//J. Appl. Phys. 1958, Vol. 29. P. 480—485.
269. Blair D. G., Buckingham M. I., Edwards C. e. a.//Proc. 2nd Marcel Grossmann Conf. General Relativity. Trieste. 1980. P. 185—187.
270. McGuigan D. G., Lam C. C., Douglass D. H. e. a.//J. Low Temp. Phys. 1978. Vol. 30. P. 621—626.
271. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И. Системы с малой диссипацией. М.: Наука. 1981.
272. Гранато А., Люкке К.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова и Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А. С. 261—321.
273. Пападакис Э.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова и В. А. Шутилова. 1970 М.: Мир. Т. 4. Ч. Б. С. 317—381.
274. Helme B. G., King P. J.//Phys. Stat. Solids. 1978. Vol. 45. P. K33—K39.

275. Hickernell F. S.//IEEE Trans. Microwave Theory and Techn., 1969. Vol. MTT-17. P. 957—963.
276. Landolt-Börnstein, Zalenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue Series. Bd 3. Ferro- und Antiferroelectrische Substanzen. Berlin. 1969.
277. Venturini E. L., Spencer E. G., Ballmann A. A.//J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1622—1628.
278. Меркулов Л. Г., Коваленок Р. В., Коноводченко Е. В.//Физика твердого тела, 1969 Т. 11. С. 2769—2774; 1971. Т. 13. С. 1171—1176; 1972. Т. 14. С. 340—344.
279. Auld B. A. Acoustic Fields and Waves in Solids. N. Y.: John Wiley, 1973.
280. Holland M. G.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1968. Vol. SU-15. P. 18—31.
281. Губанов А. И., Давыдов С. Ю.//Физика твердого тела, 1972. Т. 14. С. 2187—2191.
282. Oliver D. W., Slack G. A.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 1542—1547.
283. Rehwal W.//Ibid. 1973. Vol. 44. P. 3017—3021.
284. Шлеман Е., Джозеф Р. И., Кохейн Т.//Тр. Ин-та электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С. 1685—1698.
285. Беляев Л. М., Багдасаров Х. С., Сильвестрова И. М. и др.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 941—945.
286. Гришмановский А. П., Юшин Н. К., Богданов В. Л. и др.//Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 1833—1838.
287. Абрамович А. А., Хромова Н. Н., Шутилов В. А.//Акуст. журн. 1976. Т. 22. С. 278—283.
288. Wilkinson C. D., Caddes D. E.//J. Opt. Soc. Amer. 1966. Vol. 40. P. 498—504.
289. Broussand G. Optoelectronique/Ed. Masson. Paris. 1974.
290. Меркулов Л. Г., Яковлев Л. А.//Акуст. журн. 1959. Т. 5. С. 374—381.
291. King P. J.//J. Phys. 1970. Vol. 3. P. 500—506.
292. Мاستихин В. М., Богданов С. В., Дарвойд Т. И. и др.//Оптико-механическая промышленность. 1977. № 8. С. 36—43.
293. Семенов В. И., Сапожников В. К., Авдиенко К. И. и др.//Физика твердого тела. 1976. Т. 18. С. 2805—2809.
294. Smith A. B., Kedzie R. W., McManon D. H. e. a.//J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 2687—2692.
295. Василевская А. С., Сонин А. С., Рез И. С. и др.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1967. Т. 31. С. 1159—1163.
296. Ohmachi J., Uchida N.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 521—527.
297. Мастихин В. М., Сапожников В. К., Сербуленко М. Г. и др.//Автометрия, 1975. Т. 3. С. 31—38.
298. Lewis I. T., Lehoczky A., Briscoe C. V.//Phys. Rev. 1967. Vol. 161. P. 877—883.
299. Hemphill R.//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 35—37.
300. Holovey M. I., Gurzan M. J., Olexeyk J. D. e. a.//Kristall und Techn. 1973. Bd 8. S. 453—457.
301. Есаян С. Х., Леманов В. В., Рез И. С. и др.//Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 907—912.
302. Богданов С. В., Зубринов И. И., Шелопут Д. В.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 2013—2017.
303. Dutoit H.//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1973. Vol. SU-20. P. 279—291.
304. Midford T. A., Wanuga S.//J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 3362—3368.
305. Fitzgerald T. M., Chick B. B., Truel R.//Ibid 1964. Vol. 35. P. 2647—2653.
306. Григорьев М. А., Зюрюкин Ю. А., Наянов В. И. и др.//Физика твердого тела. 1970. Т. 12. С. 3033—3038.
307. Григорьев М. А., Зайцев Б. Д., Пылаева Г. И. и др.//Там же, 1973. Т. 15. С. 1398—1402.
308. Мэзон У. Физическая акустика: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А.
309. Fitzgerald T. M., Silverman B. D.//Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 25A. P. 245—246.
310. Reinjes J., Schulz M. B.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 5254—5262.
311. Smakula A. Einkristalle, Wachstum, Herstellung und Anwendung. Berlin. 1962.
312. Леманов В. В. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Л.: ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе. 1973.
313. Luthi B., Pollina R. J.//Phys. Rev. 1968. Vol. 167. P. 482—489.
314. Barret H. N.//Ibid. 1969. Vol. 178. P. 743—748.
315. Levy S., Truell R.//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25. P. 140—152.
316. Гончаров К. В., Ключев В. П., Лямов В. Е. и др.//Тр. VI Всесоюз. акустич. конф. М. 1968.
317. Авдонин В. Я., Леманов В. В., Смирнов И. А. и др.//Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 877—883.
318. Великов Ю. Х., Кадышев А. Е., Красильников О. Е.//Там же. 1971. Т. 13. С. 1310—1320.
319. Dransfeld K.//J. Phys. Colliq. Cl, Suppl. 2. 1967. Vol. 28. P. 157—162.
320. Де-Клерк Дж.//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А. С. 231—272.
321. Григорьев М. А., Зюрюкин Ю. А., Наянов В. И. и др.//Электронная техника. Сер. Контрольно-измерительная аппаратура. 1970. Вып. 1(19). С. 121—126.
322. Иванов С. Н., Котелянский И. М., Медведев В. В. и др.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1976. Т. 70. С. 281—286.
323. Bommel H.//Phys. Rev. 1955. Vol. 100. P. 758—766.
324. Самулионис В. И., Кунигелис В. Ф., Гаршка Э. П.//Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 459—461.
325. Майщик Е. П., Струков Б. А., Сняжков Е. В. и др.//Физика твердого тела. 1977. Т. 19. С. 335—340.
326. Богданов С. В., Балакирев М. К., Иванова Е. В. и др.//Материалы XII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов. 1983. Ч. I. С. 15—17.
327. Абрамович А. Л., Шутилов В. А., Левицкая Т. Д. и др.//Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 2585—2590.
328. Илизавский Ю. В., Стернин В. М.//Материалы XII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов, 1983. Ч. II. С. 281—282.
329. Антонов С. Н., Проклов В. В., Миргородский В. И. и др. Материалы XI Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Душанбе. 1981. Ч. I. С. 174—175.
330. Keller O.//Phys. Lett. 1972. Vol. 39A. P. 235—236; Siebert F., Keller O., Wettling W.//Phys. Stat. Sol. 1971. Vol. 4. P. 67—71.
331. Farnell G. M.//Wave Electronics. 1976. Vol. 2. P. 1—24.
332. Carr P. H.//IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1969. Vol. MTT-17, N 11. P. 458—471.
333. Salzmann E., Pleninger T., Dransfeld K.//Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 13. P. 14—17.
334. Акустические кристаллы: Справочник/Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука. 1982.

# ГЛАВА 8 ТЕРМОМЕТРИЯ

А. В. Инюшкин

## 8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Температура — фундаментальная физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Измерение температуры предполагает построение шкалы температур на основе воспроизведения ряда равновесных состояний — основных реперных (постоянных) точек, которым приписаны определенные значения температур, и создания интерполяционных приборов, реализующих шкалу между ними.

11-я Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла в качестве основной «Международную термодинамическую температурную шкалу (Кельвина)». Термин «основная шкала» означает, согласно положению конференции, что должна «существовать возможность в конечном счете отнести к этой шкале результат любого измерения температуры». Термодинамическая шкала температур определяется соотношением, которое выводят из рассмотрения обратного цикла Карно,

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2,$$

где  $Q_1$  — количество теплоты, которое машина Карно получила при температуре  $T_1$  в обратимом изотермическом процессе;  $Q_2$  — количество теплоты, которое машина отдала при температуре  $T_2$  во втором изотермическом процессе. Термодинамическая шкала не зависит от природы рабочего тела.

Термодинамическую температуру обозначают символом  $T$ . Ее единица\*<sup>1</sup> — кельвин (символ К) определена как  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды [1].

Термодинамическую температуру выражают также через температуру Цельсия (символ  $t$ ), которая определена соотношением

$$t = T - 273,15 \text{ К}.$$

Единица температуры Цельсия — градус Цельсия (символ  $^{\circ}\text{C}$ ). Градус Цельсия равен кельвину.

Прямое использование цикла Карно для измерения температуры обычно приводит к большим экспериментальным погрешностям. Поэтому разработаны практические методы воспроизведения термодинамической температуры, в которых связь между измеряемой величиной и температурой выводят на основе законов термодинамики или статистической физики. К числу таких соотношений относятся уравнение состояния газа, закон Кюри для парамагнетиков, зависимость скорости звука в газе от температуры, зависимость напряжения тепловых шумов на электрическом сопротивлении от температуры, закон Стефана — Больцмана. Температурные шкалы, установленные с использованием указанных соотношений, зависят от свойств термометрического тела, что приводит к появлению таких характеристик шкалы, как воспроизводимость и точность. Кроме того, некоторые шкалы основаны на приближению выполняющихся закономерностей; возникает понятие инструментальной температуры (магнитной, цветовой и т. п.), отличной от термодинамической.

\*<sup>1</sup> Современное определение единицы термодинамической температуры было принято 10-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1954 г.). До 1967 г. единица имела название «градус Кельвина».

Экспериментальные трудности, возникающие при воспроизведении термодинамической шкалы, обходят введением практических температурных шкал\*<sup>2</sup>. Практические шкалы устанавливают так, чтобы температуры, измеренные по ним, совпадали с термодинамическими в пределах точности соответствующих первичных приборов.

Первая практическая температурная шкала была принята 7-й Генеральной конференцией по мерам и весам и получила название Международной температурной шкалы 1927 г. (МТШ — 27). Переработанная редакция этой шкалы — МТШ — 48 — была принята 9-й Генеральной конференцией по мерам и весам в 1948 г., а исправленная ее редакция — Международная практическая температурная шкала 1948 года (МПТШ — 48) — 11-й Генеральной конференцией (1960 г.). В настоящее время у з а к о н е н а шкала 1968 года — МПТШ — 68 (исправленная редакция 1975 г.). В 1976 г. Консультативный комитет по термометрии при Международном бюро мер и весов рекомендовал для использования в области низких температур *предварительную температурную шкалу* (ПТШ — 76). Планируется, что в 1987 г. Генеральная конференция примет новую международную практическую температурную шкалу, которая будет определенным объединением переработанных и уточненных шкал МПТШ — 68 и ПТШ — 76.

Общие вопросы термометрии в том или ином аспекте рассмотрены в [2—11]. Большое количество информации по всем разделам термометрии имеется в трудах серии международных конференций по термометрии [12].

## 8.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Помимо шкал Кельвина и Цельсия в некоторых странах используют шкалы Ренкина, Фаренгейта и Реомюра. Между единицами температуры по этим шкалам и кельвином справедливы соотношения:

$$\text{градус Ренкина } (^{\circ}\text{Ra}) = \frac{5}{9} \text{ К};$$

$$\text{градус Фаренгейта } (^{\circ}\text{F}) = \frac{5}{9} \text{ К};$$

$$\text{градус Реомюра } (^{\circ}\text{R}) = \frac{5}{4} \text{ К}.$$

Пересчет значений температуры между шкалами осуществляют по формулам

$$n (^{\circ}\text{Ra}) = \frac{5}{9} n (\text{К}) = \left( \frac{5}{9} n - 273,15 \right) (^{\circ}\text{C});$$

$$n (^{\circ}\text{F}) = \left[ \frac{5}{9} (n - 32) + 273,15 \right] (\text{К}) = \\ = \frac{5}{9} (n - 32) (^{\circ}\text{C});$$

$$n (^{\circ}\text{R}) = \left( \frac{5}{4} n + 273,15 \right) (\text{К}) = \frac{5}{4} n (^{\circ}\text{C});$$

\*<sup>2</sup> Термин «практическая шкала» вводят для того, чтобы отличать значения температуры, определенные по данной шкале, от соответствующих значений по термодинамической шкале температур.

$$n(K) = \frac{9}{4} n(^{\circ}\text{Ra}); \quad n(^{\circ}\text{C}) = \frac{9}{4} (n + 273,15) (^{\circ}\text{Ra});$$

$$n(K) = \left[ \frac{9}{5} (n - 273,15) + 32 \right] (^{\circ}\text{F});$$

$$n(^{\circ}\text{C}) = \left( \frac{9}{5} n + 32 \right) (^{\circ}\text{F});$$

$$n(K) = \frac{4}{5} (n - 273,15) (^{\circ}\text{R}); \quad n(^{\circ}\text{C}) = \frac{4}{5} n(^{\circ}\text{R}).$$

Международная практическая температурная шкала 1968 года (МПТШ—68) принята на сессии Международного бюро мер и весов (1968 г.) в соответствии с решением 13-й Генеральной конференции по мерам и весам. Исправленная редакция шкалы принята 15-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1975 г.).

Данная шкала установлена для температур выше 13,81 К. В МПТШ—68 используются международные практические температуры Кельвина ( $T_{68}$ ) и Цельсия ( $t_{68}$ ):  $t_{68} = T_{68} - 273,15$  К. Единицы международной практической температуры — кельвин (К) и градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ):  $1 \text{ К} = 1^{\circ}\text{C}$ .

Основные реперные точки МПТШ—68 и приписанные им значения  $T_{68}$  приведены в табл. 8.1.

В качестве интерполяционного прибора для области температур от 13,81 К до 630,74  $^{\circ}\text{C}$  применяют платиновый термометр сопротивления<sup>\*1</sup>. Его относительное сопротивление определяют по формуле

$$W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273,15 \text{ К}),$$

где  $R$  — сопротивление термометра. Значение  $W(T_{68})$  должно быть не меньше 1,39250 при  $T_{68} = 373,15$  К.

Для области от 13,81 до 273,15 К температуру  $T_{68}$  определяют по формуле

$$W(T_{68}) = W_{\text{ККТ-68}}(T_{68}) + \Delta W_i(T_{68}), \quad (8.1)$$

где  $W_{\text{ККТ-68}}(T_{68})$  — относительное сопротивление, соответствующее стандартной функции (табл. 8.2). Поправки  $\Delta W_i(T_{68})$  при температурах основных реперных точек получают из измеренных значений  $W(T_{68})$  и соответствующих значений  $W_{\text{ККТ-68}}(T_{68})$  (табл. 8.3). При промежуточных температурах  $\Delta W_i(T_{68})$  определяют по интерполяционным формулам

$$13,81 \text{ К} - 20,28 \text{ К}: \Delta W_1(T_{68}) = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3. \quad (8.2)$$

Константы  $A_1, B_1, C_1$  и  $D_1$  определяют из значений  $\Delta W(T_{68})$ , измеренных в тройной точке равновесного водорода, при температуре 17,042 К и точке кипения равновесного водорода, а также из значения  $d(\Delta W)/dT_{68}$  в точке кипения равновесного водорода, вычисленной по уравнению (8.3):

$$20,28 \text{ К} - 54,361 \text{ К}: \Delta W_2(T_{68}) = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3; \quad (8.3)$$

Константы  $A_2, B_2, C_2$  и  $D_2$  определяют из значений  $\Delta W(T_{68})$ , измеренных в точке кипения равновесного водорода, точке кипения неона и тройной точке кислорода, а также из значения  $d(\Delta W)/dT_{68}$  в тройной точке кислорода, вычисленной из уравнения (8.4):

$$54,361 \text{ К} - 90,188 \text{ К}: \Delta W_3(T_{68}) = A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2. \quad (8.4)$$

Константы  $A_3, B_3$  и  $C_3$  определяют из значений  $\Delta W(T_{68})$ , измеренных в тройной точке и точке кипения кислорода (или тройной точке аргона), а также из значения  $d(\Delta W)/dT_{68}$  в точке кипения кислорода (тройной точке аргона), вычисленной по уравнению (8.5),

$$90,188 \text{ К} - 273,15 \text{ К}: \Delta W_4(T_{68}) = b_4 (T_{68} - 273,15 \text{ К}) + e_4 (T_{68} - 273,15 \text{ К})^3 (T_{68} - 373,15 \text{ К}). \quad (8.5)$$

Константы  $b_4$  и  $e_4$  определяют из значений  $\Delta W(T_{68})$ , измеренных в точке кипения кислорода (или тройной точке аргона) и точке кипения воды.

Для области от 0 до 630,74  $^{\circ}\text{C}$  температуру  $t_{68}$  определяют по формуле

$$t_{68} = t' + 0,045 \left( \frac{t'}{100^{\circ}\text{C}} \right) \left( \frac{t'}{100^{\circ}\text{C}} - 1 \right) \times \left( \frac{t'}{419,58^{\circ}\text{C}} - 1 \right) \left( \frac{t'}{630,74^{\circ}\text{C}} - 1 \right)^{\circ}\text{C}. \quad (8.6)$$

Здесь

$$t' = \left\{ \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left( \frac{t'}{100^{\circ}\text{C}} \right) \left( \frac{t'}{100^{\circ}\text{C}} - 1 \right) \right\}^{\circ}\text{C}, \quad (8.7a)$$

где  $W(t') = R(t')/R(0^{\circ}\text{C})$ .

Константы  $R(0^{\circ}\text{C})$ ,  $\alpha$  и  $\delta$  определяют измерением сопротивления в тройной точке воды, точке кипения воды (или затвердевания олова) и точке затвердевания цинка.

Уравнение (8.7a) эквивалентно уравнению

$$W(t') = 1 + At' + Bt'^2, \quad (8.7b)$$

где  $A = \alpha(1 + \delta/100^{\circ}\text{C})$ ,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $B = -10^{-4}\alpha\delta$ ,  $^{\circ}\text{C}^{-2}$ .

Для области от 630,74 до 1064,43  $^{\circ}\text{C}$  температуру  $t_{68}$  определяют по уравнению

$$E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2, \quad (8.8)$$

где  $E(t_{68})$  — ЭДС эталонного платинородий-(Pt+10% Rh)-платинового термоэлектрического термометра, один спай которого находится при 0  $^{\circ}\text{C}$ , а другой — при температуре  $t_{68}$ ;  $a, b, c$  — константы, вычисляемые по значениям  $E(t_{68})$  при температуре  $630,74 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , измеряемой платиновым термометром сопротивления, и в точках затвердевания серебра и золота.

Для области выше 1064,43  $^{\circ}\text{C}$  (1337,58 К) температуру  $t_{68}$  ( $t_{68} = T_{68} - 273,15$  К) определяют по уравнению

$$\frac{L_{\lambda}(T_{68})}{L_{\lambda}(T_{68}(\text{Au}))} = \frac{\exp \left[ \frac{c_2}{\lambda T_{68}(\text{Au})} \right] - 1}{\exp \left[ \frac{c_2}{\lambda T_{68}} \right] - 1}, \quad (8.9)$$

где  $L_{\lambda}(T_{68})$  и  $L_{\lambda}(T_{68}(\text{Au}))$  — спектральные плотности энергии излучения черного тела для длины волны (в вакууме)  $\lambda$  при температуре  $T_{68}$  и в точке затвердевания золота  $T_{68}(\text{Au})$ ;  $c_2 = 0,014388 \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Наряду с основными реперными точками МПТШ—68 имеются и другие реперные точки. Некоторые из них и их температуры по МПТШ—68 указаны в табл. 8.4.

Приведенное описание МПТШ—68 (редакция 1975 г.) не является полным. Полный текст см. в [13—15], дополнительная информация имеется в [83].

<sup>\*1</sup> Практически два платиновых термометра с  $R(273,15 \text{ К})$ , равным 100 и 10 Ом.

Таблица 8.1. Основные реперные (постоянные) точки МПТШ—68 [15] и реперные точки ПТШ—76 [19]

| Вещество и состояние равновесия |           | Приписанное значение температуры |                          |                     |
|---------------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------|---------------------|
|                                 |           | $T_{68}, \text{ K}$              | $t_{68}, ^\circ\text{C}$ | $T_{76}, \text{ K}$ |
| ● Cd                            | ТСП       | —                                | —                        | 0,519               |
| ● Zn                            | ТСП       | —                                | —                        | 0,851               |
| ● Al                            | ТСП       | —                                | —                        | 1,1796              |
| ● In                            | ТСП       | —                                | —                        | 3,4145              |
| ● <sup>4</sup> He               | ТК        | —                                | —                        | 4,2221              |
| ● Pb                            | ТСП       | —                                | —                        | 7,1999              |
| * ● e — H <sub>2</sub>          | ТТ (а)    | 13,81                            | —259,34                  | 13,8044             |
| * ● e — H <sub>2</sub>          | РЖП (а)   | 17,042                           | —256,108                 | 17,0373             |
| * ● e — H <sub>2</sub>          | ТК (а)    | 20,28                            | —252,87                  | 20,2734             |
| * ● Ne                          | ТТ (б)    | 24,561                           | —248,589                 | 24,5591             |
| * ● Ne                          | ТК (б)    | 27,102                           | —246,048                 | 27,102              |
| * ● O <sub>2</sub>              | ТТ        | 54,361                           | —218,789                 | —                   |
| * ● Ar                          | ТТ (г)    | 83,798                           | —189,352                 | —                   |
| * ● O <sub>2</sub>              | ТК (г)    | 90,188                           | —182,962                 | —                   |
| * ● H <sub>2</sub> O            | ТТ (в)    | 273,15                           | 0,01                     | —                   |
| * ● H <sub>2</sub> O            | ТК (в, д) | 373,15                           | 100                      | —                   |
| * ● Sn                          | ТЗ (д)    | 505,1181                         | 231,9681                 | —                   |
| * ● Zn                          | ТЗ        | 692,73                           | 419,58                   | —                   |
| * ● Ag                          | ТЗ        | 1235,08                          | 961,93                   | —                   |
| * ● Au                          | ТЗ        | 1337,58                          | 1064,43                  | —                   |

Примечания: \* Основная реперная точка МПТШ—68; ● — реперная точка ПТШ—76. Значения температур даны для состояния равновесия при давлении  $p_0 = 101\,325 \text{ Па}$  (760 мм рт. ст.), за исключением ТТ, РЖП, ТСП.

а) — e — H<sub>2</sub> — равновесный водород: водород, имеющий свою равновесную орто-пара-концентрацию при данной температуре;

б) — нормальный изотопный состав Ne: 2,7 ммоль <sup>21</sup>Ne и 92 ммоль <sup>22</sup>Ne на 0,905 моль <sup>20</sup>Ne.

в) — вода должна иметь изотопный состав океанской воды.

г) — Ar ТТ может быть использована вместо O<sub>2</sub> ТК.

д) — Sn ТЗ может быть использована вместо H<sub>2</sub>O ТК.

Сокращения:

ТСП — точка сверхпроводящего перехода: температура перехода между сверхпроводящим и нормальным состоянием в нулевом магнитном поле;

ТТ — тройная точка (равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами);

ТК — точка кипения (равновесие между жидкой и парообразной фазами);

РЖП — равновесие между жидкой и парообразной фазами при давлении 33360,6 Па (25/76  $p_0$ );

ТЗ — точка затвердевания (равновесие между твердой и жидкой фазами).

Таблица 8.2. Значения стандартной функции  $W_{\text{ККТ-68}}(T_{68})$  для платиновых термометров сопротивления в области температур от 13,81 до 273,15 К [15]

$$T_{68} = \sum_{j=0}^{20} a_j \left( \frac{\ln W_{\text{ККТ-68}}(T_{68}) + 3,28}{3,28} \right)^j \text{ K}$$

| $i$ | $a_i$    | $i$ | $a_i$      |
|-----|----------|-----|------------|
| 0   | 38,59276 | 10  | 239,50285  |
| 1   | 43,44837 | 11  | 524,64944  |
| 2   | 39,10887 | 12  | —319,79981 |
| 3   | 38,69352 | 13  | —787,60686 |
| 4   | 32,56883 | 14  | 179,54782  |
| 5   | 24,70158 | 15  | 700,42832  |

Продолжение табл. 8.2

| $i$ | $a_i$      | $i$ | $a_i$      |
|-----|------------|-----|------------|
| 6   | 53,03828   | 16  | 29,48666   |
| 7   | 77,35767   | 17  | —335,24378 |
| 8   | —95,75103  | 18  | —77,25660  |
| 9   | —223,52892 | 19  | 66,76292   |
|     |            | 20  | 24,44911   |

Стандартная функция  $W_{\text{ККТ-68}}(T_{68})$  при  $T_{68} = 273,15 \text{ K}$  переходит в функцию  $W(t_{68})$ , заданную уравнениями (8.6) и (8.7) для  $\alpha = 3,9259668 \cdot 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $\delta = 1,496334^\circ\text{C}$ , таким образом, что при этой температуре совпадают значения функций, их первых и вторых производных.

Таблица 8.3. Значения  $W_{\text{ККТ-68}}(T_{68})$  при температурах реперных точек [15]

| Реперная точка                      | $T_{68}, \text{ K}$ | $t_{68}, ^\circ\text{C}$ | $W_{\text{ККТ-68}}$ |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|
| e — H <sub>2</sub> , тройная точка  | 13,81               | —259,34                  | 0,00141208          |
| e — H <sub>2</sub> , 17,042 K       | 17,042              | —256,108                 | 0,00253445          |
| e — H <sub>2</sub> , точка кипения  | 20,28               | —252,87                  | 0,00448517          |
| Ne, точка кипения                   | 27,102              | —246,048                 | 0,01221272          |
| O <sub>2</sub> , тройная точка      | 54,361              | —218,789                 | 0,09197253          |
| Ar, тройная точка                   | 83,798              | —189,352                 | 0,21605705          |
| O <sub>2</sub> , точка конденсации  | 90,188              | —182,962                 | 0,24379912          |
| H <sub>2</sub> O, точка таяния льда | 273,15              | 0                        | 1                   |
| H <sub>2</sub> O, точка кипения     | 373,15              | 100                      | 1,39259668          |

Таблица 8.4. Реперные точки [16—18]

| Состояние равновесия*1                          | $T_{68}, \text{ K}^{*2}$ |
|-------------------------------------------------|--------------------------|
| РЖП равновесного водорода                       | $13,81 < T_{68} < 23$    |
| $\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^2 a_i T_{68}^i$       |                          |
| $a_{-1} = -101,33782 \text{ K}; a_0 = 3,940796$ |                          |
| $a_1 = 5,43201 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$    |                          |
| $a_2 = -1,10563 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-2}$   |                          |
| * ТТ нормального водорода (а)                   | 13,956 — 13,958          |
| * ТК нормального водорода (а)                   | 20,397                   |
| * РЖП нормального водорода (а)                  | $13,956 < T_{68} < 30$   |
| $\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^2 a_i T_{68}^i$       |                          |
| $a_{-1} = -102,74982 \text{ K}$                 |                          |
| $a_0 = 3,994505$                                |                          |
| $a_1 = 5,33898 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$    |                          |
| $a_2 = -1,10563 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-2}$   |                          |
| $T_{\alpha-\beta}$ твердого кислорода           | 23,867                   |
| РТП неона (б)                                   | $19 < T_{68} < 24,561$   |



| Состояние равновесия*1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $T_{68}, K^{*2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $t_{68} = 356,66 + 55,552(p/p_0 - 1) -$<br>$- 23,03(p/p_0 - 1)^2 -$<br>$- 14,0(p/p_0 - 1)^3$<br>для $p$ от 90 до 104 кПа<br>* ТК серы<br>* РЖП серы<br>$t_{68} = 444,674 + 69,010(p/p_0 - 1) -$<br>$- 27,48(p/p_0 - 1)^2 +$<br>$+ 19,14(p/p_0 - 1)^3$<br>для $p$ от 90 до 104 кПа<br>* ТП медь-алюминиевой эвтектики<br>* ТЗ сурьмы<br>* ТЗ алюминия<br>ТП медь-серебряной эвтектики<br>* ТЗ меди<br>ЯТП (0,653 мкм) железа<br>ЯТП (0,653 мкм) палладия<br>ЯТП (0,997 мкм) титана<br>* ТЗ никеля<br>* ТЗ кобальта<br>ЯТП (0,653 мкм) титана<br>ТП железа<br>* ТП палладия<br>ЯТП (0,993 мкм) ванадия<br>ЯТП (0,650 мкм) циркония<br>ТП титана<br>ЯТП (0,650 мкм) ванадия<br>ЯТП (0,653 мкм) ванадия<br>* ТЗ платины<br>ТП циркония<br>* ТЗ родия<br>ЯТП (0,650 мкм) рутения<br>* ТП оксида алюминия ( $Al_2O_3$ )<br>ЯТП (0,650 мкм) ниобия<br>ЯТП (0,653 мкм) молибдена | 717,824<br>$708,15 < T_{68} < 726,15$<br><br>821,41<br>903,905<br>933,61<br>1052,72 (0,10)<br>1358,03 (0,01)<br>1670<br>1688 (5)<br>1711 (6)<br>1728<br>1768<br>1800 (6)<br>1808<br>1827 (4)<br>1875 (7)<br>1940<br>1941,5—1945<br>1988 (4)<br>1992 (7)<br>2042<br>2128<br>2236<br>2294 (8)<br>2327<br>2425—2433<br>2528—2531 |

Предварительная температурная шкала 1976 года (ПТШ—76) рекомендована Консультативным комитетом по термометрии (ККТ) при Международном бюро мер и весов для использования в диапазоне от 0,5 до 30 К [19]. ККТ разработал эту шкалу в силу того, что температуры, определенные по температурным шкалам, построенным по давлению паров гелия (шкала  $^3He$  1962 г. [21] и шкала  $^4He$  1958 г. [20]) и по нижнему участку МПТШ—68, существенно отличаются от термодинамической температуры и, кроме того, не согласуются между собой. ПТШ—76 построена с учетом гладкости по отно-

| Состояние равновесия*1                                                                                                                                                                              | $T_{68}, K^{*2}$                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ТП рутения<br>ЯТП (0,995 мкм) тантала<br>ТП оксида иттрия ( $Y_2O_3$ )<br>* ТЗ иридия<br>* ТП ниобия<br>ЯТП (0,653 мкм) тантала<br>ТП оксида бериллия ( $BeO$ )<br>* ТП молибдена<br>* ТП вольфрама | 2607 (10)<br>2620 (8)<br>2712 (12)<br>2720<br>2742—2750<br>2846 (8)<br>2851 (9)<br>2896<br>3695 |

\* Вторичная реперная точка МПТШ — 68 (редакция 1975 г.; приписанное ей значение температуры выделено жирным шрифтом. Приведенные формулы удобны для расчетов  $p(T_{68})$  газов, но они отличаются от формул, рекомендованных в МПТШ — 68.

\*1 Значения температур даны для состояний равновесия при давлении  $p_0 = 101\,325$  Па (760 мм рт. ст.), за исключением тройных точек и точек, для которых область давлений указана явно.

\*2 Для формул, описывающих зависимость  $p(T_{68})$ , указаны области их применения.

(а) — нормальный водород — водород, орто-пара-концентрация которого соответствует комнатной температуре: примерно 75% орто- и 25% пара-водорода.

(б) — нормальный изотопический состав неона: 2,7 ммоль  $^{21}Ne$  и 92 ммоль  $^{20}Ne$  на 0,905 моль  $^{20}Ne$ .

(в) — значение  $T_{68}$  при  $1/F \rightarrow 1$  (где  $F$  — доля образца в жидкой фазе).

С о к р а щ е н и я:  
 ТТ — тройная точка; ТК — точка кипения; ТП — точка плавления; ТЗ — точка затвердевания;  $T_{\alpha-\beta}$  — точка  $\alpha$  —  $\beta$ -перехода;

$T_{\beta-\gamma}$  — точка  $\beta$  —  $\gamma$ -перехода; РЖП — равновесие между жидкой и парообразной фазами; РТП — равновесие между твердой и парообразной фазами; ЯТП — яркостная температура (для данной длины волны) в точке плавления.

Яркостные температуры определены для образцов, находящихся в вакууме или среде инертного газа при атмосферном давлении. Поправки на давление пренебрежимо малы по сравнению с погрешностью измерений.

В целом погрешность реперных точек меньше чем  $\pm 0,01$  К при  $T < 1000$  К; меньше чем  $\pm 0,1$  К при  $1000$  К  $< T < 1400$  К и изменяется в пределах  $\pm 10$  К при  $T > 1400$  К.

шению к термодинамической шкале и максимального к ней приближения и непрерывности с МПТШ—68 в точке 27,1 К. Реперные точки ПТШ—76 приведены в табл. 8.1. Дополнительную информацию о ПТШ — 76 см. в [83].

В 1982 г. ККТ рекомендовал использовать уравнения для зависимости давления насыщенных паров изотопов гелия от температуры  $T_{76}$  [23] (см. также [84]). Эти же уравнения рекомендовано использовать для вычисления  $T_{76}$  по измеренным значениям давления паров гелия (см. табл. 8.27 и 8.28).

Таблица 8.5. Ориентировочные значения расхождений  $t_{68} - t_{48}$ , °С, между температурами по МПТШ — 68 и МПТШ — 48 [15]

а) Для диапазона температур от —180 до 0°С

| $t_{68}, ^\circ C$ | Приращение температуры, °С |       |       |        |        |        |        |       |       |       |       |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 0                          | —10   | —20   | —30    | —40    | —50    | —60    | —70   | —80   | —90   | —100  |
| —100               | 0,022                      | 0,013 | 0,003 | —0,006 | —0,013 | —0,013 | —0,005 | 0,007 | 0,012 | —     | —     |
| 0                  | 0,000                      | 0,006 | 0,012 | 0,018  | 0,024  | 0,029  | 0,032  | 0,034 | 0,033 | 0,029 | 0,022 |

б) Для диапазона температур от 0 до 1070°С

| $t_{68}, ^\circ\text{C}$ | Приращение температуры, $^\circ\text{C}$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|--------------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                          | 0                                        | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     | 100   |
| 0                        | 0,000                                    | -0,004 | -0,007 | -0,009 | -0,010 | -0,010 | -0,010 | -0,008 | -0,006 | -0,003 | 0,000 |
| 100                      | 0,000                                    | 0,004  | 0,007  | 0,012  | 0,016  | 0,020  | 0,025  | 0,029  | 0,034  | 0,038  | 0,043 |
| 200                      | 0,043                                    | 0,047  | 0,051  | 0,054  | 0,058  | 0,061  | 0,064  | 0,067  | 0,069  | 0,071  | 0,073 |
| 300                      | 0,073                                    | 0,074  | 0,075  | 0,076  | 0,077  | 0,077  | 0,077  | 0,077  | 0,077  | 0,076  | 0,076 |
| 400                      | 0,076                                    | 0,075  | 0,075  | 0,075  | 0,074  | 0,074  | 0,074  | 0,075  | 0,076  | 0,077  | 0,079 |
| 500                      | 0,079                                    | 0,082  | 0,085  | 0,089  | 0,094  | 0,100  | 0,108  | 0,116  | 0,126  | 0,137  | 0,150 |
| 600                      | 0,150                                    | 0,165  | 0,182  | 0,200  | 0,23   | 0,25   | 0,28   | 0,31   | 0,34   | 0,36   | 0,39  |
| 700                      | 0,39                                     | 0,42   | 0,45   | 0,47   | 0,50   | 0,53   | 0,56   | 0,58   | 0,61   | 0,64   | 0,67  |
| 800                      | 0,67                                     | 0,70   | 0,72   | 0,75   | 0,78   | 0,81   | 0,84   | 0,87   | 0,89   | 0,92   | 0,95  |
| 900                      | 0,95                                     | 0,98   | 1,01   | 1,04   | 1,07   | 1,10   | 1,12   | 1,15   | 1,18   | 1,21   | 1,24  |
| 1000                     | 1,24                                     | 1,27   | 1,30   | 1,33   | 1,36   | 1,39   | 1,42   | 1,44   |        |        |       |

в) Для диапазона температур от 1100 до 4000°С

| $t_{68}, ^\circ\text{C}$ | Приращение температуры, $^\circ\text{C}$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|--------------------------|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                          | 0                                        | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| 1000                     | —                                        | 1,5 | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3,0 | 3,2  |
| 2000                     | 3,2                                      | 3,5 | 3,7 | 4,0 | 4,2 | 4,5 | 4,8 | 5,0 | 5,3 | 5,6 | 5,9  |
| 3000                     | 5,9                                      | 6,2 | 6,5 | 6,9 | 7,2 | 7,5 | 7,9 | 8,2 | 8,6 | 9,0 | 9,3  |

Таблица 8.6. Расхождения между ПТШ — 76 ( $T_{76}$ ) и МПТШ — 68 ( $T_{68}$ ) [19]

| $T_{68}, \text{K}$ | $T_{68} - T_{76}, \text{мК}$ | $T_{68}, \text{K}$ | $T_{68} - T_{76}, \text{мК}$ | $T_{68}, \text{K}$ | $T_{68} - T_{76}, \text{мК}$ |
|--------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|
| 13,81              | 5,6                          | 19,0               | 7,4                          | 24,5               | 2,1                          |
| 14,0               | 4,6                          | 19,5               | 7,3                          | 25,0               | 1,6                          |
| 14,5               | 3,0                          | 20,0               | 6,9                          | 25,5               | 1,1                          |
| 15,0               | 2,0                          | 20,5               | 6,4                          | 26,0               | 0,7                          |
| 15,5               | 2,2                          | 21,0               | 5,8                          | 26,5               | 0,3                          |
| 16,0               | 2,6                          | 21,5               | 5,3                          | 27,0               | 0,0                          |
| 16,5               | 3,6                          | 22,0               | 4,8                          | 27,1               | 0,0                          |
| 17,0               | 4,6                          | 22,5               | 4,2                          | 28,0               | 0,0                          |
| 17,5               | 5,6                          | 23,0               | 3,7                          | 29,0               | 0,0                          |
| 18,0               | 6,5                          | 23,5               | 3,2                          | 30,0               | 0,0                          |
| 18,5               | 7,2                          | 24,0               | 2,7                          |                    |                              |

Таблица 8.7. Расхождения между ПТШ — 76 ( $T_{76}$ ) и шкалами, построенными по давлению паров гелия ( $T_{58}, T_{62}$ ) [19]

| $T_{\text{ср}}, \text{K}$ | $T_{\text{ср}} - T_{76}, \text{мК}$ | $T_{\text{ср}}, \text{K}$ | $T_{\text{ср}} - T_{76}, \text{мК}$ | $T_{58}, \text{K}$ | $T_{58} - T_{76}, \text{мК}$ |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------------------|
| 0,5                       | -1,9                                | 1,8                       | -3,9                                | 3,2                | -6,6                         |
| 0,6                       | -2,1                                | 2,0                       | -4,1                                | 3,4                | -6,8                         |
| 0,8                       | -2,5                                | 2,2                       | -4,4                                | 3,6                | -7,0                         |
| 1,0                       | -2,9                                | 2,4                       | -4,9                                | 3,8                | -7,0                         |
| 1,2                       | -3,2                                | 2,6                       | -5,4                                | 4,0                | -7,1                         |
| 1,4                       | -3,5                                | 2,8                       | -5,9                                | 4,2                | -7,1                         |
| 1,6                       | -3,7                                | 3,0                       | -6,3                                | 4,5                | -7,1                         |
|                           |                                     | 3,2                       | -6,6                                | 5,0                | -7,1                         |

Примечание.  $T_{\text{ср}}$  — среднее из  $T_{58}$  и  $T_{62}$  в области от 0,5 до 3,2 К.

Таблица 8.8. Расхождение между ПТШ — 76 ( $T_{76}$ ) и шкалами, воспроизводимыми государственными первичными эталонами ( $T_9$ ) [22]

| $T_{76}, \text{K}$ | $T_9 - T_{76}, \text{мК}$ | $T_{76}, \text{K}$ | $T_9 - T_{76}, \text{мК}$ | $T_{76}, \text{K}$ | $T_9 - T_{76}, \text{мК}$ | $T_{76}, \text{K}$ | $T_9 - T_{76}, \text{мК}$ |
|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
|                    |                           | 3,9                | -7,0                      | 8,5                | +1,5                      | 17,0               | +4,6                      |
| 1,8                | -2,1                      | 4,2                | -6,5                      | 9,0                | +4,1                      | 18,0               | +4,9                      |
| 2,0                | -3,8                      | 4,5                | -5,3                      | 9,5                | +5,4                      | 19,0               | +5,9                      |
| 2,2                | -4,4                      | 5,0                | -5,0                      | 10,0               | +5,8                      | 20,0               | +6,5                      |
| 2,4                | -4,4                      | 5,5                | -6,0                      | 11,0               | +5,5                      | 21,0               | +6,9                      |
| 2,6                | -4,3                      | 6,0                | -7,4                      | 12,0               | +4,5                      | 22,0               | +7,0                      |
| 3,0                | -5,0                      | 6,5                | -8,1                      | 13,0               | +4,2                      | 23,0               | +6,4                      |
| 3,3                | -6,1                      | 7,0                | -7,1                      | 14,0               | +4,3                      | 24,0               | +5,9                      |
| 3,6                | -6,9                      | 7,5                | -4,6                      | 15,0               | +4,3                      | 25,0               | +4,2                      |
|                    |                           | 8,0                | -1,3                      | 16,0               | +4,4                      | 26,0               | +3,0                      |
|                    |                           |                    |                           |                    |                           | 27,1               | +2,0                      |

Наблюдаемое при 27,1 К расхождение 2 мК объясняется различием в реализации точки кипения неона, принятой во ВНИИФТРИ и при построении ПТШ—76. В случае, когда необходимо иметь градуировки термометров, непрерывные в точке 27,1 К (т. е. непрерывно переходящие в МПТШ—68, воспроизводимую государственным первичным эталоном), рекомендуется уменьшать приведенные в таблице поправки на  $\Delta T = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ T}^2, \text{K}$ .



### 8.3. ЖИДКОСТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Жидкостная термометрия основана на тепловом расширении жидкости. Вследствие различия теплового расширения жидкости и стеклянного (кварцевого) резервуара, в который она заключена, при изменении температуры изменяется длина столбика жидкости, находящейся в капилляре. Температуру определяют по положению мениска относительно шкалы, нанесенной непосредственно на капилляр или на пластинку, жестко соединенную с ним. Жидкостные термометры применяют для измерения температур от  $-200$  до  $1200$  °C. В табл. 8.9 и 8.10 приведены сведения о свойствах важнейших термометрических жидкостей и стекол, используемых при изготовлении термометров.

Точность измерений зависит от глубины погружения жидкостного термометра в измеряемую среду. Погружать термометр следует до отсчитываемого деления шкалы

или до специально нанесенной на шкале черты. Если это невозможно, то вводят поправку на выступающий столбик, равную для термометров, градуированных при полном погружении,

$$\Delta t = l\alpha(t_1 - t_2),$$

при частичном погружении

$$\Delta t = l\alpha(t_0 - t_2),$$

где  $t_2$  — средняя температура выступающего столбика, °C;  $t_1$  — произведенный отсчет по термометру, °C;  $t_0$  — температура столбика при градуировке, °C;  $l$  — длина выступающего столбика, выраженная в делениях шкалы, °C;  $\alpha$  — коэффициент поправки на выступающий столбик, °C<sup>-1</sup>.

Вопросы жидкостной термометрии рассмотрены в [6, 10, 24—30].

Таблица 8.9. Свойства веществ, используемых в жидкостно-стеклянных термометрах [24]

| Вещество            | Формула                                       | $\beta^*$ , $10^{-6}$ К <sup>-1</sup> | $t$ , °C            |                   |
|---------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------|
|                     |                                               |                                       | затвердевания       | кипения           |
| Ртуть               | Hg                                            | 182,5                                 | —38,87              | 356,7             |
| Таллиевая амальгама | 8,5 % TI                                      | 182                                   | —60                 | От 360 до 1460    |
| Сложная амальгама   | —                                             | 180                                   | —90                 | От 360 до 2000    |
| Галлий              | Ga                                            | 55                                    | 29,8                | 2070              |
| Ацетон              | CO (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>            | 1310                                  | От —93,9 до —94,9   | 56,0              |
| Керосин             | —                                             | 1150                                  | От —50 до —15       | От 200 до 290     |
| Пентан              | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>                | 1550                                  | Ниже —200           | От 30 до 40       |
| Петролейный эфир    | —                                             | 1220                                  | Ниже —100           | От 40 до 70       |
| Спирт этиловый      | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH              | 1100                                  | От —111,8 до —117,3 | От 77,7 до 78,4   |
| Спирт метиловый     | CH <sub>3</sub> OH                            | 1220                                  | От —93,8 до —97,8   | От 64,2 до 66,0   |
| Сероуглерод         | CS <sub>2</sub>                               | 1210                                  | —113,0              | 46,0              |
| Толуол              | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> | 1090                                  | От —92,4 до —102,0  | От 109,2 до 110,6 |

\*  $\beta$  — коэффициент объемного расширения.

Таблица 8.10. Значения коэффициента поправки на выступающий столбик для некоторых жидкостно-стеклянных термометров [24]

| Сорт стекла        | Жидкость | $\alpha$ , $10^{-6}$ °C <sup>-1</sup> | Сорт стекла                | Жидкость     | $\alpha$ , $10^{-6}$ °C <sup>-1</sup> |
|--------------------|----------|---------------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------------------|
| 360 (ГОСТ 1224—71) | Ртуть    | 160                                   | Плавленый кварц            | Ртуть        | 180                                   |
| 500 »              | »        | 165                                   | Стекло при $t > 0^\circ$ C | Органическая | 1300                                  |
| 650 »              | »        | 170                                   | Стекло при $t < 0^\circ$ C | »            | 800                                   |

Таблица 8.11. Пределы допускаемых погрешностей показаний жидкостно-стеклянных термометров, °C [24]

| Диапазон измеряемых температур |     | Цена деления шкалы, °C |       |       |          |      |    |    |       |
|--------------------------------|-----|------------------------|-------|-------|----------|------|----|----|-------|
|                                |     | 0,01                   | 0,02  | 0,05  | 0,1; 0,2 | 0,5  | 1  | 2  | 5; 10 |
| от                             | до  |                        |       |       |          |      |    |    |       |
| —35                            | 0   | ±0,05                  | ±0,08 | ±0,10 | ±0,3     | ±1,0 | ±1 | ±2 | ±5    |
| 0                              | 100 | ±0,04                  | ±0,08 | ±0,10 | ±0,2     | ±1,0 | ±1 | ±2 | ±5    |
| 100                            | 200 | —                      | ±0,10 | ±0,25 | ±0,4     | ±1,0 | ±2 | ±2 | ±5    |
| 200                            | 300 | —                      | —     | ±0,40 | ±1,0     | ±2,0 | ±3 | ±4 | ±5    |
| 300                            | 400 | —                      | —     | —     | ±1,0     | ±3,0 | ±4 | ±4 | ±10   |
| 400                            | 500 | —                      | —     | —     | —        | ±3,0 | ±5 | ±5 | ±10   |
| 500                            | 600 | —                      | —     | —     | —        | —    | ±6 | ±6 | ±10   |
| 600                            | 650 | —                      | —     | —     | —        | —    | ±6 | ±6 | ±15   |

## 8.4. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Принцип действия термометров сопротивления (ТС) основан на зависимости электрического сопротивления металлов, сплавов и полупроводников от температуры. Для определения температуры по измеренному значению электрического сопротивления пользуются эмпирическими формулами или таблицами. Термометры для точных измерений (с погрешностью менее 0,001 К) — платиновый, германиевый — градуируют индивидуально. ТС применяют для измерения температур примерно от 0,01 К до 1100 °С.

Широкое распространение для измерения температур от —200 до 750 °С (реже от —260 до 1100 °С) получили платиновые ТС (ТСП) благодаря исключительно хорошим термометрическим свойствам платины [10, 11, 24—27, 31—38]. В области от —200 до 200 °С часто применяют медные ТС (ТСМ) [24, 39]. Для ТСП и ТСМ созданы стандартные градуировочные таблицы (табл. 8.12, 8.13). Характеристики промышленных ТС см. в [24, 33—35].

Полупроводниковые ТС используют обычно для измерения температур ниже 0 °С [11, 43, 47]. Основное преимущество полупроводниковых ТС состоит в том, что их чувствительность гораздо выше чувствительности металлических ТС при низких температурах. В низкотемпературной термометрии применяют германиевые [11, 35, 40—42], угольные [44], арсенид-галлиевые ТС [45].

Наряду с ТС для измерения низких температур разработаны термодиоды из Ge, Si, GaAs. Термометрическим параметром таких термометров является напряжение на диоде, смещенном в прямом направлении [46].

Полупроводниковые термометры имеют сложную и плохо воспроизводимую от образца к образцу зависимость термометрического параметра от температуры, что не позволяет создать для них стандартные градуировочные характеристики.

## 8.5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Термоэлектрическая термометрия основана на температурной зависимости термо-ЭДС ( $E$ ), возникающей в термопаре — проводнике, состоящем из двух соединенных разнородных электропроводящих элементов (обычно металлических проводников, реже полупроводников). Термопары широко используются для измерения температур примерно от 4 до 3000 К.

Погрешность определения температуры с помощью термопар составляет, как правило, несколько кельвинов, а у некоторых достигает 0,01 К. Точность термопары (дифференциального прибора) зависит от точности поддержания и измерения температуры свободного (реперного) спая термопары.

Для определения температуры по измеренной ЭДС пользуются таблицами или эмпирическими формулами. Представленные зависимости  $E(T)$  являются базовыми для градуировки конкретных термопар. Поправочная функция в виде степенного полинома находится по отклонениям значений ЭДС от табличных в нескольких температурных точках. Градуировочные таблицы стандартных термопар соответствуют реальным в пределах указанной рабочей погрешности.

Зависимость  $E(t)$  большинства термопар в рабочем диапазоне температур (либо в его части) может быть

аппроксимирована полиномом вида  $E = \sum_{i=0}^n a_i t^i$ . Коэффици-

циенты полиномов приведены в [10, 60].

Вопросы термоэлектрической термометрии рассмотрены в [6, 25, 49, 52].

Таблица 8.12. Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления [24]

Электрическое сопротивление ТСП ГОСТ 6651—78, отн. ед.,  $(R(t)/R(0^\circ \text{C}))$ ; температура, °С (МПТШ—68)

| $t, ^\circ \text{C}$ | Приращение температуры, °С |         |         |         |         |
|----------------------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                      | 0                          | 2       | 4       | 6       | 8       |
| —260                 | 0,00406                    | —       | —       | —       | —       |
| —250                 | 0,01022                    | 0,00827 | 0,00673 | 0,00555 | 0,00465 |
| —240                 | 0,02701                    | 0,02269 | 0,01886 | 0,01550 | 0,01262 |
| —230                 | 0,05487                    | 0,04855 | 0,04257 | 0,03696 | 0,03176 |
| —220                 | 0,09058                    | 0,08298 | 0,07559 | 0,06842 | 0,06151 |
| —210                 | 0,13075                    | 0,12248 | 0,11431 | 0,10626 | 0,09834 |
| —200                 | 0,17307                    | 0,16450 | 0,15598 | 0,14751 | 0,13909 |
| —190                 | 0,21657                    | 0,20784 | 0,19909 | 0,19035 | 0,18168 |
| —180                 | 0,25986                    | 0,25122 | 0,24258 | 0,23392 | 0,22525 |
| —170                 | 0,30279                    | 0,29422 | 0,28563 | 0,27703 | 0,26842 |
| —160                 | 0,34552                    | 0,33699 | 0,32846 | 0,31992 | 0,31137 |
| —150                 | 0,38799                    | 0,37949 | 0,37101 | 0,36252 | 0,35402 |
| —140                 | 0,43008                    | 0,42168 | 0,41326 | 0,40483 | 0,39639 |
| —130                 | 0,47195                    | 0,46359 | 0,45523 | 0,44686 | 0,43847 |
| —120                 | 0,51359                    | 0,50528 | 0,49696 | 0,48862 | 0,48029 |
| —110                 | 0,55500                    | 0,54673 | 0,53846 | 0,53018 | 0,52189 |
| —100                 | 0,59621                    | 0,58799 | 0,57975 | 0,57151 | 0,56326 |
| —90                  | 0,63724                    | 0,62906 | 0,62086 | 0,61265 | 0,60443 |
| —80                  | 0,67812                    | 0,66996 | 0,66179 | 0,65362 | 0,64544 |
| —70                  | 0,71883                    | 0,71070 | 0,70256 | 0,69443 | 0,68628 |
| —60                  | 0,75940                    | 0,75130 | 0,74319 | 0,73508 | 0,72695 |
| —50                  | 0,79983                    | 0,79175 | 0,78368 | 0,77559 | 0,76750 |
| —40                  | 0,84012                    | 0,83207 | 0,82402 | 0,81596 | 0,80790 |
| —30                  | 0,88028                    | 0,87226 | 0,86423 | 0,85629 | 0,84816 |
| —20                  | 0,92032                    | 0,91231 | 0,90431 | 0,89631 | 0,88830 |
| —10                  | 0,96022                    | 0,95225 | 0,94428 | 0,93629 | 0,92830 |
| — 0                  | 1,00000                    | 0,99206 | 0,98411 | 0,97615 | 0,96819 |
| 0                    | 1,00000                    | 1,00794 | 1,01587 | 1,02380 | 1,03172 |
| 10                   | 1,03965                    | 1,04757 | 1,05548 | 1,06339 | 1,07129 |
| 20                   | 1,07919                    | 1,08708 | 1,09498 | 1,10286 | 1,11073 |
| 30                   | 1,11861                    | 1,12647 | 1,13434 | 1,14220 | 1,15006 |
| 40                   | 1,15791                    | 1,16575 | 1,17359 | 1,18142 | 1,18925 |
| 50                   | 1,19708                    | 1,20490 | 1,21271 | 1,22053 | 1,22833 |
| 60                   | 1,23613                    | 1,24393 | 1,25172 | 1,25951 | 1,26729 |
| 70                   | 1,27507                    | 1,28283 | 1,29060 | 1,29836 | 1,30612 |
| 80                   | 1,31388                    | 1,32162 | 1,32936 | 1,33710 | 1,34484 |
| 90                   | 1,35256                    | 1,36028 | 1,36801 | 1,37572 | 1,38343 |
| 100                  | 1,39113                    | 1,39883 | 1,40653 | 1,41423 | 1,42191 |
| 110                  | 1,42959                    | 1,43727 | 1,44494 | 1,45260 | 1,46026 |
| 120                  | 1,46792                    | 1,47558 | 1,48322 | 1,49087 | 1,49851 |
| 130                  | 1,50613                    | 1,51377 | 1,52138 | 1,52900 | 1,53662 |
| 140                  | 1,54423                    | 1,55183 | 1,55943 | 1,56704 | 1,57463 |
| 150                  | 1,58221                    | 1,58979 | 1,59736 | 1,60494 | 1,61251 |
| 160                  | 1,62007                    | 1,62763 | 1,63518 | 1,64274 | 1,65027 |
| 170                  | 1,65781                    | 1,66535 | 1,67288 | 1,68040 | 1,68793 |
| 180                  | 1,69544                    | 1,70295 | 1,71045 | 1,71795 | 1,72545 |
| 190                  | 1,73294                    | 1,74043 | 1,74791 | 1,75540 | 1,76287 |
| 200                  | 1,77033                    | 1,77779 | 1,78525 | 1,79271 | 1,80016 |
| 210                  | 1,80760                    | 1,81504 | 1,82248 | 1,82991 | 1,83734 |
| 220                  | 1,84475                    | 1,85217 | 1,85958 | 1,86698 | 1,87439 |
| 230                  | 1,88179                    | 1,88919 | 1,89658 | 1,90397 | 1,91135 |
| 240                  | 1,91873                    | 1,92610 | 1,93347 | 1,94083 | 1,94819 |
| 250                  | 1,95552                    | 1,96287 | 1,97021 | 1,97755 | 1,98488 |
| 260                  | 1,99221                    | 1,99953 | 2,00686 | 2,01417 | 2,02148 |
| 270                  | 2,02878                    | 2,03608 | 2,04338 | 2,05067 | 2,05796 |
| 280                  | 2,06523                    | 2,07251 | 2,07978 | 2,08705 | 2,09432 |
| 290                  | 2,10158                    | 2,10883 | 2,11607 | 2,12332 | 2,13056 |
| 300                  | 2,13779                    | 2,14503 | 2,15225 | 2,15947 | 2,16668 |
| 310                  | 2,17390                    | 2,18111 | 2,18830 | 2,19550 | 2,20270 |
| 320                  | 2,20988                    | 2,21708 | 2,22425 | 2,23142 | 2,23859 |
| 330                  | 2,24576                    | 2,25292 | 2,26007 | 2,26723 | 2,27437 |
| 340                  | 2,28151                    | 2,28865 | 2,29578 | 2,30291 | 2,31002 |
| 350                  | 2,31715                    | 2,32427 | 2,33137 | 2,33848 | 2,34558 |

| t, °C | Приращение температуры, °C |         |         |         |         |
|-------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
|       | 0                          | 2       | 4       | 6       | 8       |
| 360   | 2,35267                    | 2,35977 | 2,36685 | 2,37393 | 2,38100 |
| 370   | 2,38807                    | 2,39515 | 2,40220 | 2,40926 | 2,41631 |
| 380   | 2,42336                    | 2,43040 | 2,43744 | 2,44447 | 2,45150 |
| 390   | 2,45853                    | 2,46555 | 2,47256 | 2,47957 | 2,48657 |
| 400   | 2,49358                    | 2,50057 | 2,50756 | 2,51455 | 2,52153 |
| 410   | 2,52852                    | 2,53549 | 2,54246 | 2,54942 | 2,55638 |
| 420   | 2,56333                    | 2,57028 | 2,57722 | 2,58416 | 2,59110 |
| 430   | 2,59803                    | 2,60495 | 2,61187 | 2,61879 | 2,62570 |
| 440   | 2,63260                    | 2,63950 | 2,64640 | 2,65330 | 2,66019 |
| 450   | 2,66707                    | 2,67395 | 2,68082 | 2,68769 | 2,69456 |
| 460   | 2,70142                    | 2,70827 | 2,71512 | 2,72196 | 2,72880 |
| 470   | 2,73564                    | 2,74247 | 2,74930 | 2,75611 | 2,76292 |
| 480   | 2,76975                    | 2,77655 | 2,78335 | 2,79014 | 2,79694 |
| 490   | 2,80372                    | 2,81051 | 2,81729 | 2,82406 | 2,83083 |
| 500   | 2,83760                    | 2,84435 | 2,85110 | 2,85785 | 2,86460 |
| 510   | 2,87134                    | 2,87808 | 2,88481 | 2,89152 | 2,89825 |
| 520   | 2,90496                    | 2,91168 | 2,91839 | 2,92508 | 2,93178 |
| 530   | 2,93847                    | 2,94516 | 2,95184 | 2,95852 | 2,96518 |
| 540   | 2,97185                    | 2,97852 | 2,98518 | 2,99182 | 2,99848 |
| 550   | 3,00511                    | 3,01176 | 3,01838 | 3,02502 | 3,03163 |
| 560   | 3,03826                    | 3,04488 | 3,05148 | 3,05809 | 3,06468 |
| 570   | 3,07128                    | 3,07787 | 3,08446 | 3,09104 | 3,09762 |
| 580   | 3,10418                    | 3,11074 | 3,11731 | 3,12386 | 3,13040 |
| 590   | 3,13694                    | 3,14348 | 3,15001 | 3,15655 | 3,16308 |
| 600   | 3,16960                    | 3,17611 | 3,18262 | 3,18913 | 3,19563 |
| 610   | 3,20212                    | 3,20861 | 3,21510 | 3,22158 | 3,22806 |
| 620   | 3,23453                    | 3,24100 | 3,24746 | 3,25392 | 3,26037 |
| 630   | 3,26682                    | 3,27325 | 3,27968 | 3,28611 | 3,29253 |
| 640   | 3,29894                    | 3,30536 | 3,31178 | 3,31818 | 3,32458 |
| 650   | 3,33098                    | 3,33737 | 3,34375 | 3,35013 | 3,35650 |
| 660   | 3,36288                    | 3,36924 | 3,37560 | 3,38196 | 3,38830 |
| 670   | 3,39465                    | 3,40099 | 3,40732 | 3,41365 | 3,41998 |
| 680   | 3,42631                    | 3,43263 | 3,43896 | 3,44527 | 3,45158 |
| 690   | 3,45788                    | 3,46417 | 3,47046 | 3,47674 | 3,48302 |
| 700   | 3,48931                    | 3,49558 | 3,50184 | 3,50810 | 3,51435 |
| 710   | 3,52061                    | 3,52686 | 3,53310 | 3,53934 | 3,54557 |
| 720   | 3,55180                    | 3,55808 | 3,56426 | 3,57048 | 3,57670 |
| 730   | 3,58291                    | 3,58911 | 3,59531 | 3,60149 | 3,60768 |
| 740   | 3,61387                    | 3,62004 | 3,62621 | 3,63238 | 3,63854 |
| 750   | 3,64470                    | 3,65085 | 3,65700 | 3,66314 | 3,66928 |
| 760   | 3,67542                    | 3,68156 | 3,68769 | 3,69382 | 3,69994 |
| 770   | 3,70606                    | 3,71218 | 3,71828 | 3,72438 | 3,73047 |
| 780   | 3,73655                    | 3,74265 | 3,74873 | 3,75480 | 3,76087 |
| 790   | 3,76693                    | 3,77300 | 3,77905 | 3,78510 | 3,79114 |
| 800   | 3,79719                    | 3,80322 | 3,80925 | 3,81527 | 3,82129 |
| 810   | 3,82732                    | 3,83334 | 3,83935 | 3,84536 | 3,85137 |
| 820   | 3,85737                    | 3,86335 | 3,86934 | 3,87533 | 3,88130 |
| 830   | 3,88727                    | 3,89323 | 3,89919 | 3,90514 | 3,91110 |
| 840   | 3,91705                    | 3,92300 | 3,92894 | 3,93487 | 3,94079 |
| 850   | 3,94672                    | 3,95264 | 3,95856 | 3,96447 | 3,97037 |
| 860   | 3,97627                    | 3,98217 | 3,98806 | 3,99394 | 3,99982 |
| 870   | 4,00571                    | 4,01158 | 4,01746 | 4,02333 | 4,02919 |
| 880   | 4,03505                    | 4,04091 | 4,04675 | 4,05258 | 4,05841 |
| 890   | 4,06425                    | 4,07007 | 4,07589 | 4,08171 | 4,08751 |
| 900   | 4,09333                    | 4,09912 | 4,10493 | 4,11072 | 4,11652 |
| 910   | 4,12231                    | 4,12808 | 4,13385 | 4,13961 | 4,14537 |
| 920   | 4,15114                    | 4,15690 | 4,16265 | 4,16840 | 4,17414 |
| 930   | 4,17989                    | 4,18561 | 4,19133 | 4,19705 | 4,20277 |
| 940   | 4,20849                    | 4,21420 | 4,21991 | 4,22561 | 4,23130 |
| 950   | 4,23699                    | 4,24269 | 4,24838 | 4,25406 | 4,25974 |
| 960   | 4,26542                    | 4,27107 | 4,27672 | 4,28238 | 4,28902 |
| 970   | 4,29366                    | 4,29930 | 4,30494 | 4,31056 | 4,31619 |
| 980   | 4,32181                    | 4,32742 | 4,33303 | 4,33863 | 4,34422 |
| 990   | 4,34982                    | 4,35542 | 4,36101 | 4,36660 | 4,37218 |
| 1000  | 4,37776                    | 4,38332 | 4,38888 | 4,39444 | 4,40000 |
| 1010  | 4,40554                    | 4,41108 | 4,41662 | 4,42215 | 4,42768 |

| t, °C | Приращение температуры, °C |         |         |         |         |
|-------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
|       | 0                          | 2       | 4       | 6       | 8       |
| 1020  | 4,43321                    | 4,43874 | 4,44426 | 4,44976 | 4,45527 |
| 1030  | 4,46077                    | 4,46627 | 4,47177 | 4,47726 | 4,48274 |
| 1040  | 4,48823                    | 4,49371 | 4,49918 | 4,50464 | 4,51009 |
| 1050  | 4,51555                    | 4,52100 | 4,52645 | 4,53189 | 4,53732 |
| 1060  | 4,54276                    | 4,54819 | 4,55361 | 4,55903 | 4,56446 |
| 1070  | 4,56987                    | 4,57529 | 4,58069 | 4,58610 | 4,59149 |
| 1080  | 4,59688                    | 4,60226 | 4,60764 | 4,61302 | 4,61839 |
| 1090  | 4,62376                    | 4,62912 | 4,63448 | 4,63983 | 4,64518 |
| 1100  | 4,65052                    | 4,65586 | 4,66119 | 4,66652 | 4,67184 |

Таблица 8.13. Стандартная градуировочная таблица медного термометра сопротивления [24]

Электрическое сопротивление TCM (ГОСТ 6651—78), отн. ед. ( $R(t)/R(0^\circ\text{C})$ ); температура, °C (МПТШ—68)

| t, °C | Приращение температуры, °C |         |         |         |         |
|-------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
|       | 0                          | 2       | 4       | 6       | 8       |
| —200  | 0,12160                    | —       | —       | —       | —       |
| —190  | 0,16270                    | 0,15420 | 0,14590 | 0,13780 | 0,12970 |
| —180  | 0,20610                    | 0,19730 | 0,18850 | 0,17980 | 0,17120 |
| —170  | 0,25080                    | 0,24170 | 0,23270 | 0,22380 | 0,21490 |
| —160  | 0,29620                    | 0,28710 | 0,27800 | 0,26890 | 0,25990 |
| —150  | 0,34180                    | 0,33270 | 0,32360 | 0,31450 | 0,30530 |
| —140  | 0,38730                    | 0,37820 | 0,36920 | 0,36000 | 0,35090 |
| —130  | 0,43210                    | 0,42320 | 0,41430 | 0,40530 | 0,39640 |
| —120  | 0,47690                    | 0,46800 | 0,45900 | 0,45000 | 0,44100 |
| —110  | 0,52160                    | 0,51260 | 0,50370 | 0,49480 | 0,48590 |
| —100  | 0,56610                    | 0,55720 | 0,54830 | 0,53940 | 0,53050 |
| —90   | 0,61030                    | 0,60150 | 0,59270 | 0,58380 | 0,57490 |
| —80   | 0,65420                    | 0,64540 | 0,63660 | 0,62790 | 0,61910 |
| —70   | 0,69790                    | 0,68920 | 0,68050 | 0,67170 | 0,66300 |
| —60   | 0,74150                    | 0,73280 | 0,72410 | 0,71540 | 0,70670 |
| —50   | 0,78480                    | 0,77620 | 0,76750 | 0,75880 | 0,75020 |
| —40   | 0,82810                    | 0,81950 | 0,81080 | 0,80220 | 0,79350 |
| —30   | 0,87120                    | 0,86260 | 0,85400 | 0,84540 | 0,83670 |
| —20   | 0,91420                    | 0,90560 | 0,89700 | 0,88840 | 0,87980 |
| —10   | 0,95720                    | 0,94860 | 0,94000 | 0,93140 | 0,92280 |
| —     | 0,100000                   | 0,99144 | 0,98288 | 0,97432 | 0,96576 |
| 0     | 1,00000                    | 1,00856 | 1,01712 | 1,02568 | 1,03424 |
| 10    | 1,04281                    | 1,05138 | 1,05994 | 1,06850 | 1,07707 |
| 20    | 1,08563                    | 1,09419 | 1,10275 | 1,11131 | 1,11988 |
| 30    | 1,12844                    | 1,13700 | 1,14556 | 1,15412 | 1,16268 |
| 40    | 1,17124                    | 1,17980 | 1,18836 | 1,19692 | 1,20548 |
| 50    | 1,21404                    | 1,22260 | 1,23116 | 1,23972 | 1,24828 |
| 60    | 1,25684                    | 1,26540 | 1,27396 | 1,28252 | 1,29107 |
| 70    | 1,29963                    | 1,30819 | 1,31675 | 1,32531 | 1,33386 |
| 80    | 1,34242                    | 1,35098 | 1,35954 | 1,36810 | 1,37666 |
| 90    | 1,38522                    | 1,39377 | 1,40233 | 1,41088 | 1,41945 |
| 100   | 1,42800                    | 1,43656 | 1,44512 | 1,45368 | 1,46224 |
| 110   | 1,47079                    | 1,47935 | 1,48790 | 1,49646 | 1,50502 |
| 120   | 1,51357                    | 1,52213 | 1,53069 | 1,53924 | 1,54780 |
| 130   | 1,55635                    | 1,56491 | 1,57346 | 1,58202 | 1,59058 |
| 140   | 1,59913                    | 1,60769 | 1,61625 | 1,62481 | 1,63336 |
| 150   | 1,64192                    | 1,65048 | 1,65904 | 1,66759 | 1,67615 |
| 160   | 1,68470                    | 1,69326 | 1,70182 | 1,71037 | 1,71893 |
| 170   | 1,72748                    | 1,73604 | 1,74460 | 1,75316 | 1,76171 |
| 180   | 1,77026                    | 1,77882 | 1,78738 | 1,79594 | 1,80449 |
| 190   | 1,81305                    | 1,82160 | 1,83016 | 1,83872 | 1,84727 |
| 200   | 1,85583                    | —       | —       | —       | —       |

Обзор термпар для измерения высоких температур см. в [37, 50, 51, 53]. Обширный каталог термпар и об- суждение их характеристик см. в [54, 60].

Таблица 8.14. Значения эксплуатационных характеристик термопар [24, 26, 27, 34, 50, 60]

| Термопара                | Рабочий интервал*, К | Максимальная термо-ЭДС, мВ | Погрешность, К | Рабочая среда                                 |
|--------------------------|----------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------------------|
| Си — константан          | 10—670 (870)         | 21 (34,3)                  | 0,1—5          | Окислительная, воздух до 470 К                |
| Си — Au + 1,9% Со        | 2—270                | 10,2                       | 0,1—1,5        | Окислительная, воздух                         |
| Хромель — Au + 1,9% Со   | 2—270                | 13,8                       | 0,1—1,5        | То же                                         |
| Си — Au + 0,07% Fe       | 2—270                | 1,7                        | 0,05—0,3       | »                                             |
| Хромель — Au + 0,07% Fe  | 2—270                | 5,2                        | 0,05—0,3       | »                                             |
| Си — копель              | 20—320               | 6,1                        | 0,1—5          | »                                             |
| Fe — константан          | 70—1000 (1500)       | 41 (70)                    | 0,5—3          | Окислительная до 1000 К, нейтральная          |
| Pt — Pt + 10% Rh         | 270—1570 (1870)      | 13 (16,6)                  | 0,5—6          | Окислительная                                 |
| Pt + 6% Ph — Pt + 30% Rh | 570—1870 (2070)      | 11 (14)                    | 0,5—7          | »                                             |
| Хромель — копель         | 220—870 (1070)       | 49 (66)                    | 1—3            | Окислительная, нейтральная                    |
| Хромель — алюминель      | 220—1270 (1570)      | 41 (52)                    | 4—10           | То же                                         |
| W + 5% Re — W + 20% Re   | 270—2070 (2770)      | 27 (33,6)                  | 8—30           | Вакуум, инертная, слабовосстановительная      |
| Никель — нихром          | 250—1500             | 49                         | 1—10           | Окислительная                                 |
| Нихросил — нисил         | 20—1570              | 47,5                       | <10            | Окислительная, воздух                         |
| Ir — Ir + 60% Rh         | 500—2400             | 11,6                       | 10—22          | Вакуум, окислительная, слабовосстановительная |
| W — Мо                   | 1300—3000            | 9                          | 10             | Вакуум, инертная, восстановительная           |

\* В скобках указаны значения температур, до которых кратковременно можно применять термопары.

Таблица 8.15. Градуировочная таблица низкотемпературных термопар [55, 56]

Температура свободных концов 0° С; константан (ГОСТ 5307—77): 59,9% Си, 40±1 % Ni, 0,5 ± 0,1 % Mn; хромель: 90—91 % Ni, 9—10 % Cr

| Т, К | Константан — Си |              | Au + 1,9 % Со — Си |              | Au + 1,9 % Со — хромель |              | Au + 0,07 % Fe — Си |              | Au + 0,07 % Fe — хромель |              |
|------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|-------------------------|--------------|---------------------|--------------|--------------------------|--------------|
|      | Е, мкВ          | dE/dT, мкВ/К | Е, мкВ             | dE/dT, мкВ/К | Е, мкВ                  | dE/dT, мкВ/К | Е, мкВ              | dE/dT, мкВ/К | Е, мкВ                   | dE/dT, мкВ/К |
| 2    | 6029,25         | —0,100       | 10263,0            | —2,812       | 13813,0                 | —2,868       | 1729,9              | —10,875      | 5262,7                   | —11,05       |
| 3    | 6029,00         | —0,412       | 10259,7            | —3,718       | 13809,5                 | —3,985       | 1718,6              | —11,676      | 5251,2                   | —12,08       |
| 4    | 6028,43         | —0,719       | 10255,5            | —4,609       | 13805,0                 | —5,077       | 1706,6              | —12,38       | 5238,6                   | —12,97       |
| 5    | 6027,56         | —1,023       | 10250,5            | —5,486       | 13799,4                 | —6,144       | 1693,9              | —12,97       | 5225,3                   | —13,73       |
| 6    | 6026,39         | —1,323       | 10244,6            | —6,349       | 13792,7                 | —7,188       | 1680,7              | —13,48       | 5211,2                   | —14,38       |
| 7    | 6024,91         | —1,620       | 10237,8            | —7,197       | 13785,0                 | —8,210       | 1667,0              | —13,90       | 5196,5                   | —14,93       |
| 8    | 6023,15         | —1,913       | 10230,2            | —8,031       | 13776,3                 | —9,209       | 1652,9              | —14,23       | 5181,4                   | —15,39       |
| 9    | 6021,09         | —2,203       | 10221,7            | —8,849       | 13766,6                 | —10,19       | 1638,5              | —14,48       | 5165,8                   | —15,77       |
| 10   | 6018,7          | —2,489       | 10212,5            | —9,653       | 13755,9                 | —11,14       | 1624,0              | —14,67       | 5149,8                   | —16,08       |
| 12   | 6013,2          | —3,051       | 10191,6            | —11,22       | 13731,8                 | —13,00       | 1594,4              | —14,86       | 5117,2                   | —16,52       |
| 14   | 6006,6          | —3,599       | 10167,6            | —12,72       | 13704,0                 | —14,77       | 1564,7              | —14,85       | 5083,9                   | —16,77       |
| 16   | 5998,8          | —4,134       | 10140,7            | —14,17       | 13672,7                 | —16,47       | 1535,1              | —14,70       | 5050,2                   | —16,88       |
| 18   | 5990,0          | —4,657       | 10111,0            | —15,56       | 13638,2                 | —18,10       | 1505,9              | —14,45       | 5016,4                   | —16,90       |
| 20   | 5980,2          | —5,166       | 10078,6            | —16,89       | 13600,4                 | —19,67       | 1477,3              | —14,14       | 4982,6                   | —16,85       |
| 22   | 5969,4          | —5,663       | 10043,5            | —18,16       | 13559,5                 | —21,17       | 1449,4              | —13,81       | 4949,0                   | —16,77       |
| 24   | 5957,6          | —6,149       | 10006,0            | —19,38       | 13515,7                 | —22,62       | 1422,1              | —13,47       | 4915,6                   | —16,67       |
| 26   | 5944,8          | —6,622       | 9966,0             | —20,55       | 13469,1                 | —24,00       | 1395,5              | —13,16       | 4882,4                   | —16,56       |
| 28   | 5931,1          | —7,084       | 9923,8             | —21,66       | 13419,8                 | —25,34       | 1369,5              | —12,87       | 4849,3                   | —16,46       |
| 30   | 5916,5          | —7,535       | 9879,4             | —22,72       | 13367,8                 | —26,62       | 1344,0              | —12,59       | 4816,5                   | —16,37       |
| 32   | 5900,9          | —7,975       | 9833,0             | —23,73       | 13313,3                 | —27,85       | 1319,1              | —12,31       | 4783,9                   | —16,30       |
| 34   | 5884,6          | —8,405       | 9784,5             | —24,69       | 13256,4                 | —29,04       | 1294,8              | —12,05       | 4751,3                   | —16,25       |
| 36   | 5867,3          | —8,824       | 9734,2             | —25,61       | 13197,2                 | —30,18       | 1270,9              | —11,80       | 4718,9                   | —16,22       |
| 38   | 5849,3          | —9,234       | 9682,1             | —26,48       | 13135,7                 | —31,28       | 1247,6              | —11,55       | 4686,4                   | —16,20       |
| 40   | 5830,4          | —9,634       | 9628,3             | —27,31       | 13072,1                 | —32,34       | 1224,7              | —11,32       | 4654,0                   | —16,21       |
| 45   | 5779,8          | —10,60       | 9486,9             | —29,21       | 12904,1                 | —34,82       | 1169,5              | —10,77       | 4572,8                   | —16,28       |
| 50   | 5724,5          | —11,50       | 9336,6             | —30,87       | 12724,3                 | —37,09       | 1116,9              | —10,28       | 4491,1                   | —16,43       |
| 55   | 5664,8          | —12,37       | 9178,6             | —32,33       | 12533,5                 | —39,17       | 1066,7              | —9,819       | 4408,5                   | —16,62       |
| 60   | 5601,0          | —13,18       | 9013,7             | —33,61       | 12332,9                 | —41,06       | 1018,6              | —9,399       | 4324,8                   | —16,86       |
| 65   | 5533,1          | —13,96       | 8842,8             | —34,73       | 12123,2                 | —42,81       | 972,62              | —9,008       | 4239,9                   | —17,08       |

| T, K | Константан — Cu |              | Au + 1,9 % Co — Cu |              | Au + 1,9 % Co — хромель |              | Au + 0,07 % Fe — Cu |              | Au + 0,07 % Fe — хромель |              |
|------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|-------------------------|--------------|---------------------|--------------|--------------------------|--------------|
|      | E, мкВ          | dE/dT, мкВ/К | E, мкВ             | dE/dT, мкВ/К | E, мкВ                  | dE/dT, мкВ/К | E, мкВ              | dE/dT, мкВ/К | E, мкВ                   | dE/dT, мкВ/К |
| 70   | 5461,4          | -14,71       | 8666,6             | -35,71       | 11905,1                 | -44,41       | 928,37              | -8,630       | 4153,8                   | -17,34       |
| 75   | 5386,0          | -15,43       | 8485,9             | -36,58       | 11679,3                 | -45,87       | 886,12              | -8,273       | 4066,4                   | -17,60       |
| 80   | 5307,1          | -16,12       | 8301,0             | -37,35       | 11446,5                 | -47,23       | 845,60              | -7,939       | 3977,8                   | -17,84       |
| 85   | 5224,8          | -16,79       | 8112,5             | -38,04       | 11207,2                 | -48,47       | 806,70              | -7,624       | 3888,0                   | -18,06       |
| 90   | 5139,2          | -17,44       | 7920,7             | -38,65       | 10962,0                 | -49,62       | 769,33              | -7,328       | 3797,2                   | -18,27       |
| 95   | 5050,4          | -18,08       | 7726,1             | -39,21       | 10711,2                 | -50,67       | 733,39              | -7,048       | 3705,4                   | -18,46       |
| 100  | 4958,4          | -18,71       | 7528,8             | -39,71       | 10455,4                 | -51,65       | 698,82              | -6,783       | 3612,6                   | -18,65       |
| 110  | 4765,2          | -19,93       | 7127,2             | -40,58       | 9929,9                  | -53,40       | 633,48              | -6,293       | 3424,3                   | -19,01       |
| 120  | 4559,9          | -21,13       | 6717,7             | -41,31       | 9388,2                  | -54,91       | 572,79              | -5,851       | 3232,5                   | -19,35       |
| 130  | 4342,6          | -22,33       | 6301,3             | -41,93       | 8832,4                  | -56,22       | 516,31              | -5,452       | 3037,4                   | -19,67       |
| 140  | 4113,4          | -23,51       | 5879,3             | -42,46       | 8264,3                  | -57,39       | 463,64              | -5,090       | 2839,2                   | -19,97       |
| 150  | 3872,3          | -24,70       | 5452,5             | -42,90       | 7685,1                  | -58,43       | 414,41              | -4,762       | 2638,0                   | -20,26       |
| 160  | 3619,4          | -25,88       | 5021,6             | -43,27       | 7096,1                  | -59,36       | 368,30              | -4,464       | 2434,2                   | -20,52       |
| 170  | 3354,7          | -27,05       | 4587,2             | -43,59       | 6498,2                  | -60,21       | 325,64              | -4,193       | 2227,8                   | -20,75       |
| 180  | 3078,4          | -28,21       | 4150,0             | -43,86       | 5892,2                  | -60,97       | 284,37              | -3,944       | 2019,2                   | -20,97       |
| 190  | 2790,7          | -29,34       | 3710,1             | -44,10       | 5279,0                  | -61,66       | 246,10              | -3,713       | 1808,5                   | -21,16       |
| 200  | 2491,8          | -30,43       | 3268,1             | -44,30       | 4659,3                  | -62,27       | 210,06              | -3,497       | 1596,0                   | -21,34       |
| 210  | 2182,2          | -31,48       | 2824,3             | -44,46       | 4033,9                  | -62,80       | 176,12              | -3,293       | 1381,7                   | -21,52       |
| 220  | 1862,3          | -32,50       | 2379,1             | -44,57       | 3403,5                  | -63,26       | 144,17              | -3,099       | 1165,7                   | -21,68       |
| 230  | 1532,4          | -33,47       | 1933,0             | -44,63       | 2768,9                  | -63,65       | 114,10              | -2,918       | 948,13                   | -21,83       |
| 240  | 1193,1          | -34,41       | 1486,6             | -44,64       | 2130,9                  | -63,96       | 85,76               | -2,754       | 729,14                   | -21,96       |
| 250  | 844,3           | -35,35       | 1040,2             | -44,65       | 1490,0                  | -64,20       | 58,93               | -2,619       | 509,07                   | -22,04       |
| 260  | 486,1           | -36,31       | 593,3              | -44,76       | 847,2                   | -64,36       | 33,24               | -2,529       | 288,58                   | -22,04       |
| 270  | 117,8           | -37,36       | 143,8              | -45,24       | 203,3                   | -64,40       | 8,12                | -2,510       | 68,87                    | -21,88       |
| 273  | 5,2             | -37,70       | 7,7                | -45,51       | 10,1                    | -64,38       | —                   | —            | 3,37                     | -21,79       |

Таблица 8.16. Стандартная градуировочная таблица термопары медь — копель (ГОСТ 22666—77) [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C (МПТШ—68); температура свободных концов 0° C; допускаемые отклонения  $\Delta E = \pm (1,3 - 1,1 \cdot 10^{-3}t) dE/dt$ , мВ; электроды: медь электролитическая рафинированная чистотой 99,95 %, содержащая 0,02—0,07% O<sub>2</sub> и не более 0,01 % других примесей

| t, °C | Приращение температуры, °C |       |       |       |       | t, °C | Приращение температуры, °C |       |       |       |       |
|-------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|       | 0                          | 2     | 4     | 6     | 8     |       | 0                          | 2     | 4     | 6     | 8     |
| -200  | 6,154                      | —     | —     | —     | —     | -80   | 3,065                      | 3,133 | 3,199 | 3,266 | 3,331 |
| -190  | 5,975                      | 6,012 | 6,048 | 6,084 | 6,119 | -70   | 2,722                      | 2,792 | 2,861 | 2,930 | 2,998 |
| -180  | 5,781                      | 5,821 | 5,860 | 5,899 | 5,937 | -60   | 2,367                      | 2,439 | 2,510 | 2,582 | 2,652 |
| -170  | 5,572                      | 5,615 | 5,657 | 5,699 | 5,740 | -50   | 2,000                      | 2,074 | 2,148 | 2,222 | 2,295 |
| -160  | 5,349                      | 5,394 | 5,440 | 5,484 | 5,529 | -40   | 1,622                      | 1,698 | 1,774 | 1,850 | 1,925 |
| -150  | 5,111                      | 5,159 | 5,208 | 5,255 | 5,302 | -30   | 1,232                      | 1,311 | 1,389 | 1,467 | 1,545 |
| -140  | 4,859                      | 4,910 | 4,961 | 5,012 | 5,061 | -20   | 0,832                      | 0,913 | 0,993 | 1,074 | 1,153 |
| -130  | 4,593                      | 4,647 | 4,701 | 4,754 | 4,807 | -10   | 0,421                      | 0,504 | 0,587 | 0,669 | 0,751 |
| -120  | 4,313                      | 4,370 | 4,427 | 4,483 | 4,538 | 0     | 0,000                      | 0,085 | 0,170 | 0,254 | 0,338 |
| -110  | 4,021                      | 4,080 | 4,139 | 4,198 | 4,256 |       |                            |       |       |       |       |
| -100  | 3,715                      | 3,777 | 3,839 | 3,900 | 3,961 |       |                            |       |       |       |       |
| -90   | 3,396                      | 3,461 | 3,525 | 3,589 | 3,652 |       |                            |       |       |       |       |

Примечание. Для аппроксимации зависимости термо-ЭДС E, мВ, от температуры t, °C, в области температур от -255 до 50° C в [57] предлагается полином  $E = \sum_{i=1}^3 a_i t^i$ , где  $a_1 = -42,65243$  °C<sup>-1</sup>;  $a_2 = -4,9538 \cdot 10^{-2}$  °C<sup>-2</sup>;  $a_3 = 4,9 \cdot 10^{-5}$  °C<sup>-3</sup>.

Таблица 8.17. Градуировочная таблица термопары железо — константан [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C (МПТШ—68); температура свободных концов 0 °C; константан: 55—61 % Cu, 45—39 % Ni с малыми добавками Mn, Fe и с примесями C, Si, Co, Mg; железо: технически чистое безуглеродистое, примеси: 0,02—0,10 % C, не более 0,4 % Mn, не более 0,15 % Cu, от 0,005 до 0,02 % Si, S, Ni, Cr, P

| t, °C | Приращение температуры, °C |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | 0                          | 10      | 20      | 30      | 40      | 50      | 60      | 70      | 80      | 90      |
| —200  | — 7,890                    | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       |
| —100  | — 4,632                    | — 5,036 | — 5,426 | — 5,801 | — 6,159 | — 6,499 | — 6,821 | — 7,122 | — 7,402 | — 7,659 |
| — 0   | 0,000                      | — 0,501 | — 0,995 | — 1,481 | — 1,960 | — 2,431 | — 2,892 | — 3,344 | — 3,785 | — 4,215 |
| 0     | 0,000                      | 0,507   | 1,019   | 1,536   | 2,058   | 2,585   | 3,115   | 3,649   | 4,186   | 4,725   |
| 100   | 5,268                      | 5,812   | 6,359   | 6,907   | 7,457   | 8,008   | 8,560   | 9,113   | 9,667   | 10,222  |
| 200   | 10,777                     | 11,332  | 11,887  | 12,442  | 12,998  | 13,533  | 14,108  | 14,663  | 15,217  | 15,771  |
| 300   | 16,325                     | 16,879  | 17,432  | 17,984  | 18,537  | 19,089  | 19,640  | 20,192  | 20,743  | 21,295  |
| 400   | 21,846                     | 22,397  | 22,949  | 23,501  | 24,054  | 24,607  | 25,161  | 25,716  | 26,272  | 26,829  |
| 500   | 27,388                     | 27,949  | 28,511  | 29,075  | 29,642  | 30,210  | 30,782  | 31,356  | 31,933  | 32,513  |
| 600   | 33,096                     | 33,683  | 34,273  | 34,867  | 35,464  | 36,066  | 36,671  | 37,280  | 37,893  | 38,510  |
| 700   | 39,130                     | 39,754  | 40,382  | 41,013  | 41,647  | 42,283  | 42,922  | 43,563  | 44,207  | 44,852  |
| 800   | 45,498                     | 46,144  | 46,790  | 47,434  | 48,076  | 48,716  | 49,354  | 49,989  | 50,621  | 51,249  |
| 900   | 51,875                     | 52,496  | 53,115  | 53,729  | 54,341  | 54,948  | 55,553  | 56,155  | 56,753  | 57,349  |
| 1000  | 57,942                     | 58,533  | 59,121  | 59,708  | 60,293  | 60,876  | 61,459  | 62,039  | 62,619  | 63,199  |
| 1100  | 63,777                     | 64,355  | 64,933  | 65,510  | 66,087  | 66,664  | 67,240  | 67,815  | 68,390  | 68,964  |
| 1200  | 69,536                     | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       |

Таблица 8.18. Градуировочная таблица термопары медь — константан [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C (МПТШ—68); температура свободных концов 0 °C; медь: электролитическая рафинированная чистой 99,95 %, содержащая 0,02—0,07 % O<sub>2</sub> и 0,01 % примесей; константан: 55—61 % Cu, 45—39 % Ni с малыми добавками Mn, Fe и с примесями C, Si, Co, Mg

| t, °C | Приращение температуры, °C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 0                          | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     |
| —200  | —5,603                     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| —100  | —3,378                     | —3,656 | —3,923 | —4,177 | —4,419 | —4,648 | —4,865 | —5,069 | —5,261 | —5,439 |
| — 0   | 0,000                      | —0,383 | —0,757 | —1,121 | —1,475 | —1,819 | —2,152 | —2,475 | —2,788 | —3,089 |
| 0     | 0,000                      | 0,391  | 0,789  | 1,196  | 1,611  | 2,035  | 2,467  | 2,908  | 3,357  | 3,813  |
| 100   | 4,277                      | 4,749  | 5,227  | 5,712  | 6,204  | 6,702  | 7,207  | 7,718  | 8,235  | 8,757  |
| 200   | 9,286                      | 9,820  | 10,360 | 10,905 | 11,456 | 12,011 | 12,572 | 13,137 | 13,707 | 14,281 |
| 300   | 14,860                     | 15,443 | 16,030 | 16,621 | 17,217 | 17,816 | 18,420 | 19,027 | 19,638 | 20,252 |
| 400   | 20,869                     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |

Таблица 8.19. Стандартная градуировочная таблица термопары хромель — копель [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C (МПТШ—68): температура свободных концов 0 °C; предел допускаемых отклонений 0,2 мВ при  $t < 300$  °C и  $[0,2 + 6,0 \cdot 10^{-4} (t - 300)]$  мВ при  $t > 300$  °C; электроды: хромель ХХ 9,5; копель МНМц 43—0,5

| t, °C | Приращение температуры, °C |         |         |         |         |         |        |        |        |        |
|-------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
|       | 0                          | 10      | 20      | 30      | 40      | 50      | 60     | 70     | 80     | 90     |
| — 0   | — 0,000                    | — 0,640 | — 1,270 | — 1,890 | — 2,500 | — 3,110 | —      | —      | —      | —      |
| 0     | 0,000                      | 0,646   | 1,303   | 1,976   | 2,658   | 3,350   | 4,050  | 4,760  | 5,469  | 6,179  |
| 100   | 6,898                      | 7,627   | 8,366   | 9,115   | 9,865   | 10,624  | 11,393 | 12,172 | 12,961 | 13,760 |
| 200   | 14,570                     | 15,380  | 16,200  | 17,030  | 17,860  | 18,690  | 19,520 | 20,360 | 21,200 | 22,040 |
| 300   | 22,880                     | 23,720  | 24,560  | 25,410  | 26,270  | 27,130  | 28,000 | 28,870 | 29,740 | 30,610 |
| 400   | 31,480                     | 32,350  | 33,230  | 34,110  | 34,990  | 35,870  | 36,750 | 37,630 | 38,510 | 39,390 |
| 500   | 40,270                     | 41,150  | 42,030  | 42,910  | 43,790  | 44,670  | 45,550 | 46,440 | 47,330 | 48,210 |
| 600   | 49,090                     | 49,970  | 50,850  | 51,730  | 52,610  | 53,480  | 54,350 | 55,220 | 56,090 | 56,960 |
| 700   | 57,820                     | 58,680  | 59,540  | 60,400  | 61,260  | 62,120  | 62,980 | 63,840 | 64,700 | 65,560 |
| 800   | 66,420                     | —       | —       | —       | —       | —       | —      | —      | —      | —      |

Таблица 8.20. Стандартная градуировочная таблица термопары хромель — алюминий [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C (МПТШ—68); температура свободных концов 0° C; предел допускаемых отклонений 0,16 мВ при  $t < 300^{\circ}\text{C}$  и  $[0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} (t - 300)]$  мВ при  $t > 300^{\circ}\text{C}$ ; электроды: хромель НХ 9,5; алюминий НМц АК 2—2—1

| $t, ^{\circ}\text{C}$ | Приращение температуры, °C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                       | 0                          | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     |
| —0                    | —0,000                     | —0,392 | —0,777 | —1,156 | —1,527 | —1,889 | —      | —      | —      | —      |
| 0                     | 0,000                      | 0,397  | 0,798  | 1,203  | 1,611  | 2,022  | 2,436  | 2,850  | 3,266  | 3,681  |
| 100                   | 4,095                      | 4,508  | 4,919  | 5,327  | 5,733  | 6,137  | 6,539  | 6,939  | 7,338  | 7,737  |
| 200                   | 8,137                      | 8,537  | 8,938  | 9,341  | 9,745  | 10,151 | 10,560 | 10,969 | 11,381 | 11,793 |
| 300                   | 12,207                     | 12,623 | 13,039 | 13,456 | 13,874 | 14,292 | 14,712 | 15,132 | 15,552 | 15,974 |
| 400                   | 16,395                     | 16,818 | 17,241 | 17,664 | 18,088 | 18,513 | 18,938 | 19,363 | 19,788 | 20,214 |
| 500                   | 20,640                     | 21,066 | 21,493 | 21,919 | 22,346 | 22,772 | 23,198 | 23,624 | 24,050 | 24,476 |
| 600                   | 24,902                     | 25,327 | 25,751 | 26,176 | 26,599 | 27,022 | 27,445 | 27,867 | 28,288 | 28,709 |
| 700                   | 29,128                     | 29,547 | 29,965 | 30,383 | 30,799 | 31,214 | 31,629 | 32,042 | 32,455 | 32,866 |
| 800                   | 33,277                     | 33,686 | 34,095 | 34,502 | 34,909 | 35,314 | 35,718 | 36,121 | 36,524 | 36,925 |
| 900                   | 37,325                     | 37,724 | 38,122 | 38,519 | 38,915 | 39,310 | 39,703 | 40,096 | 40,488 | 40,879 |
| 1000                  | 41,269                     | 41,657 | 42,045 | 42,432 | 42,817 | 43,202 | 43,585 | 43,968 | 44,349 | 44,729 |
| 1100                  | 45,108                     | 45,486 | 45,863 | 46,238 | 46,612 | 46,985 | 47,356 | 47,726 | 48,095 | 48,462 |
| 1200                  | 48,828                     | 49,192 | 49,555 | 49,916 | 50,276 | 50,633 | 50,990 | 51,344 | 51,697 | 52,049 |
| 1300                  | 52,398                     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |

Таблица 8.21. Стандартная градуировочная таблица термопары Pt — Pt + 10 % Rh [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C (МПТШ—68); температура свободных концов 0° C; предел допускаемых отклонений 0,01 мВ при  $t < 300^{\circ}\text{C}$  и  $[0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5} (t - 300)]$  мВ при  $t > 300^{\circ}\text{C}$

| $t, ^{\circ}\text{C}$ | Приращение температуры, °C |       |       |       |       | $t, ^{\circ}\text{C}$ | Приращение температуры, °C |       |       |       |       |
|-----------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                       | 0                          | 2     | 4     | 6     | 8     |                       | 0                          | 2     | 4     | 6     | 8     |
| 0                     | 0,000                      | 0,011 | 0,022 | 0,033 | 0,044 | 340                   | 2,684                      | 2,702 | 2,721 | 2,739 | 2,758 |
| 10                    | 0,056                      | 0,067 | 0,078 | 0,090 | 0,101 | 350                   | 2,777                      | 2,795 | 2,814 | 2,833 | 2,852 |
| 20                    | 0,113                      | 0,125 | 0,137 | 0,149 | 0,161 | 360                   | 2,871                      | 2,889 | 2,908 | 2,927 | 2,946 |
| 30                    | 0,173                      | 0,185 | 0,197 | 0,209 | 0,221 | 370                   | 2,965                      | 2,984 | 3,003 | 3,022 | 3,041 |
| 40                    | 0,234                      | 0,247 | 0,259 | 0,272 | 0,285 | 380                   | 3,060                      | 3,079 | 3,098 | 3,117 | 3,136 |
| 50                    | 0,297                      | 0,310 | 0,324 | 0,337 | 0,350 | 390                   | 3,155                      | 3,174 | 3,193 | 3,212 | 3,231 |
| 60                    | 0,363                      | 0,377 | 0,390 | 0,404 | 0,418 | 400                   | 3,250                      | 3,269 | 3,288 | 3,307 | 3,326 |
| 70                    | 0,431                      | 0,445 | 0,459 | 0,473 | 0,487 | 410                   | 3,345                      | 3,364 | 3,383 | 3,402 | 3,421 |
| 80                    | 0,501                      | 0,515 | 0,529 | 0,543 | 0,557 | 420                   | 3,440                      | 3,459 | 3,478 | 3,498 | 3,517 |
| 90                    | 0,572                      | 0,586 | 0,601 | 0,615 | 0,629 | 430                   | 3,536                      | 3,555 | 3,574 | 3,594 | 3,613 |
| 100                   | 0,644                      | 0,658 | 0,673 | 0,688 | 0,702 | 440                   | 3,632                      | 3,651 | 3,670 | 3,690 | 3,709 |
| 110                   | 0,717                      | 0,732 | 0,747 | 0,762 | 0,777 | 450                   | 3,728                      | 3,748 | 3,767 | 3,787 | 3,806 |
| 120                   | 0,792                      | 0,807 | 0,822 | 0,838 | 0,853 | 460                   | 3,825                      | 3,844 | 3,864 | 3,883 | 3,902 |
| 130                   | 0,869                      | 0,884 | 0,900 | 0,916 | 0,931 | 470                   | 3,922                      | 3,942 | 3,961 | 3,981 | 4,000 |
| 140                   | 0,947                      | 0,962 | 0,978 | 0,994 | 1,010 | 480                   | 4,020                      | 4,040 | 4,059 | 4,079 | 4,098 |
| 150                   | 1,026                      | 1,042 | 1,058 | 1,074 | 1,090 | 490                   | 4,118                      | 4,138 | 4,157 | 4,177 | 4,196 |
| 160                   | 1,106                      | 1,122 | 1,138 | 1,154 | 1,171 | 500                   | 4,216                      | 4,236 | 4,256 | 4,275 | 4,295 |
| 170                   | 1,187                      | 1,203 | 1,220 | 1,236 | 1,253 | 510                   | 4,315                      | 4,335 | 4,355 | 4,374 | 4,394 |
| 180                   | 1,269                      | 1,286 | 1,302 | 1,319 | 1,336 | 520                   | 4,414                      | 4,434 | 4,454 | 4,474 | 4,494 |
| 190                   | 1,352                      | 1,369 | 1,386 | 1,402 | 1,419 | 530                   | 4,514                      | 4,534 | 4,554 | 4,574 | 4,594 |
| 200                   | 1,436                      | 1,453 | 1,470 | 1,487 | 1,504 | 540                   | 4,614                      | 4,634 | 4,654 | 4,674 | 4,694 |
| 210                   | 1,521                      | 1,538 | 1,555 | 1,572 | 1,589 | 550                   | 4,714                      | 4,734 | 4,754 | 4,774 | 4,794 |
| 220                   | 1,606                      | 1,623 | 1,640 | 1,658 | 1,675 | 560                   | 4,814                      | 4,834 | 4,854 | 4,874 | 4,894 |
| 230                   | 1,692                      | 1,710 | 1,727 | 1,744 | 1,762 | 570                   | 4,914                      | 4,934 | 4,955 | 4,975 | 4,995 |
| 240                   | 1,779                      | 1,797 | 1,814 | 1,832 | 1,850 | 580                   | 5,015                      | 5,035 | 5,055 | 5,076 | 5,096 |
| 250                   | 1,867                      | 1,885 | 1,902 | 1,920 | 1,938 | 590                   | 5,116                      | 5,136 | 5,156 | 5,176 | 5,197 |
| 260                   | 1,955                      | 1,973 | 1,990 | 2,008 | 2,026 | 600                   | 5,218                      | 5,238 | 5,259 | 5,279 | 5,300 |
| 270                   | 2,043                      | 2,061 | 2,079 | 2,097 | 2,115 | 610                   | 5,320                      | 5,340 | 5,361 | 5,381 | 5,402 |
| 280                   | 2,133                      | 2,151 | 2,169 | 2,187 | 2,205 | 620                   | 5,422                      | 5,442 | 5,463 | 5,484 | 5,504 |
| 290                   | 2,223                      | 2,241 | 2,259 | 2,277 | 2,295 | 630                   | 5,525                      | 5,546 | 5,566 | 5,587 | 5,608 |
| 300                   | 2,314                      | 2,332 | 2,350 | 2,369 | 2,387 | 640                   | 5,628                      | 5,649 | 5,669 | 5,690 | 5,711 |
| 310                   | 2,406                      | 2,424 | 2,442 | 2,461 | 2,479 | 650                   | 5,731                      | 5,752 | 5,773 | 5,793 | 5,814 |
| 320                   | 2,498                      | 2,516 | 2,535 | 2,553 | 2,572 | 660                   | 5,835                      | 5,856 | 5,876 | 5,897 | 5,918 |
| 330                   | 2,591                      | 2,609 | 2,628 | 2,646 | 2,665 | 670                   | 5,939                      | 5,960 | 5,981 | 6,001 | 6,022 |



| $t, ^\circ\text{C}$ | Приращение температуры, $^\circ\text{C}$ |        |        |        |        | $t, ^\circ\text{C}$ | Приращение температуры, $^\circ\text{C}$ |        |        |        |        |
|---------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 0                                        | 2      | 4      | 6      | 8      |                     | 0                                        | 2      | 4      | 6      | 8      |
| 680                 | 6,043                                    | 6,064  | 6,085  | 6,106  | 6,127  | 1150                | 11,306                                   | 11,330 | 11,354 | 11,378 | 11,401 |
| 690                 | 6,148                                    | 6,169  | 6,190  | 6,211  | 6,232  | 1160                | 11,425                                   | 11,449 | 11,473 | 11,497 | 11,520 |
| 700                 | 6,253                                    | 6,274  | 6,295  | 6,316  | 6,337  | 1170                | 11,544                                   | 11,568 | 11,592 | 11,616 | 11,640 |
| 710                 | 6,358                                    | 6,379  | 6,400  | 6,421  | 6,442  | 1180                | 11,664                                   | 11,688 | 11,712 | 11,736 | 11,760 |
| 720                 | 6,463                                    | 6,484  | 6,505  | 6,526  | 6,547  | 1190                | 11,784                                   | 11,808 | 11,832 | 11,856 | 11,880 |
| 730                 | 6,568                                    | 6,589  | 6,610  | 6,632  | 6,653  | 1200                | 11,904                                   | 11,928 | 11,952 | 11,976 | 12,000 |
| 740                 | 6,674                                    | 6,695  | 6,717  | 6,738  | 6,759  | 1210                | 12,024                                   | 12,048 | 12,072 | 12,096 | 12,120 |
| 750                 | 6,780                                    | 6,802  | 6,823  | 6,844  | 6,866  | 1220                | 12,144                                   | 12,168 | 12,192 | 12,216 | 12,240 |
| 760                 | 6,887                                    | 6,909  | 6,930  | 6,951  | 6,973  | 1230                | 12,264                                   | 12,288 | 12,312 | 12,336 | 12,360 |
| 770                 | 6,994                                    | 7,016  | 7,037  | 7,058  | 7,080  | 1240                | 12,384                                   | 12,408 | 12,432 | 12,456 | 12,480 |
| 780                 | 7,101                                    | 7,123  | 7,144  | 7,166  | 7,188  | 1250                | 12,504                                   | 12,528 | 12,552 | 12,576 | 12,600 |
| 790                 | 7,209                                    | 7,231  | 7,252  | 7,274  | 7,296  | 1260                | 12,624                                   | 12,648 | 12,672 | 12,696 | 12,720 |
| 800                 | 7,317                                    | 7,339  | 7,361  | 7,383  | 7,405  | 1270                | 12,744                                   | 12,768 | 12,792 | 12,816 | 12,840 |
| 810                 | 7,426                                    | 7,448  | 7,470  | 7,492  | 7,514  | 1280                | 12,865                                   | 12,889 | 12,913 | 12,937 | 12,961 |
| 820                 | 7,535                                    | 7,557  | 7,579  | 7,601  | 7,623  | 1290                | 12,986                                   | 13,010 | 13,034 | 13,058 | 13,082 |
| 830                 | 7,645                                    | 7,667  | 7,689  | 7,711  | 7,733  | 1300                | 13,107                                   | 13,131 | 13,155 | 13,179 | 13,203 |
| 840                 | 7,754                                    | 7,776  | 7,798  | 7,820  | 7,842  | 1310                | 13,228                                   | 13,252 | 13,276 | 13,300 | 13,324 |
| 850                 | 7,864                                    | 7,886  | 7,908  | 7,930  | 7,952  | 1320                | 13,349                                   | 13,373 | 13,397 | 13,421 | 13,445 |
| 860                 | 7,974                                    | 7,996  | 8,018  | 8,040  | 8,062  | 1330                | 13,470                                   | 13,494 | 13,518 | 13,542 | 13,566 |
| 870                 | 8,084                                    | 8,106  | 8,128  | 8,150  | 8,172  | 1340                | 13,591                                   | 13,615 | 13,639 | 13,663 | 13,687 |
| 880                 | 8,194                                    | 8,216  | 8,238  | 8,260  | 8,282  | 1350                | 13,712                                   | 13,736 | 13,760 | 13,784 | 13,808 |
| 890                 | 8,305                                    | 8,327  | 8,349  | 8,371  | 8,393  | 1360                | 13,833                                   | 13,857 | 13,881 | 13,905 | 13,929 |
| 900                 | 8,416                                    | 8,438  | 8,460  | 8,482  | 8,504  | 1370                | 13,954                                   | 13,978 | 14,002 | 14,026 | 14,050 |
| 910                 | 8,527                                    | 8,549  | 8,571  | 8,594  | 8,616  | 1380                | 14,075                                   | 14,099 | 14,123 | 14,147 | 14,171 |
| 920                 | 8,639                                    | 8,661  | 8,683  | 8,706  | 8,728  | 1390                | 14,195                                   | 14,219 | 14,243 | 14,267 | 14,291 |
| 930                 | 8,751                                    | 8,773  | 8,796  | 8,818  | 8,841  | 1400                | 14,315                                   | 14,339 | 14,363 | 14,387 | 14,411 |
| 940                 | 8,864                                    | 8,887  | 8,909  | 8,932  | 8,955  | 1410                | 14,435                                   | 14,459 | 14,483 | 14,507 | 14,531 |
| 950                 | 8,978                                    | 9,001  | 9,023  | 9,046  | 9,069  | 1420                | 14,554                                   | 14,578 | 14,602 | 14,626 | 14,650 |
| 960                 | 9,092                                    | 9,115  | 9,137  | 9,160  | 9,183  | 1430                | 14,674                                   | 14,698 | 14,722 | 14,746 | 14,770 |
| 970                 | 9,206                                    | 9,229  | 9,251  | 9,274  | 9,297  | 1440                | 14,794                                   | 14,818 | 14,842 | 14,866 | 14,890 |
| 980                 | 9,320                                    | 9,343  | 9,366  | 9,389  | 9,412  | 1450                | 14,914                                   | 14,938 | 14,962 | 14,986 | 15,010 |
| 990                 | 9,435                                    | 9,458  | 9,481  | 9,504  | 9,527  | 1460                | 15,034                                   | 15,058 | 15,082 | 15,106 | 15,130 |
| 1000                | 9,550                                    | 9,573  | 9,596  | 9,619  | 9,642  | 1470                | 15,154                                   | 15,178 | 15,202 | 15,226 | 15,250 |
| 1010                | 9,665                                    | 9,688  | 9,711  | 9,734  | 9,757  | 1480                | 15,273                                   | 15,297 | 15,321 | 15,345 | 15,369 |
| 1020                | 9,780                                    | 9,803  | 9,826  | 9,849  | 9,872  | 1490                | 15,392                                   | 15,416 | 15,440 | 15,464 | 15,487 |
| 1030                | 9,895                                    | 9,918  | 9,941  | 9,965  | 9,988  | 1500                | 15,511                                   | 15,535 | 15,559 | 15,583 | 15,607 |
| 1040                | 10,011                                   | 10,036 | 10,058 | 10,081 | 10,105 | 1510                | 15,630                                   | 15,654 | 15,678 | 15,702 | 15,726 |
| 1050                | 10,128                                   | 10,152 | 10,175 | 10,198 | 10,222 | 1520                | 15,749                                   | 15,773 | 15,796 | 15,820 | 15,844 |
| 1060                | 10,245                                   | 10,269 | 10,292 | 10,315 | 10,339 | 1530                | 15,867                                   | 15,891 | 15,914 | 15,938 | 15,962 |
| 1070                | 10,362                                   | 10,385 | 10,409 | 10,432 | 10,455 | 1540                | 15,985                                   | 16,009 | 16,032 | 16,055 | 16,079 |
| 1080                | 10,479                                   | 10,502 | 10,526 | 10,549 | 10,572 | 1550                | 16,102                                   | 16,126 | 16,149 | 16,172 | 16,196 |
| 1090                | 10,596                                   | 10,620 | 10,643 | 10,667 | 10,690 | 1560                | 16,219                                   | 16,243 | 16,266 | 16,289 | 16,313 |
| 1100                | 10,714                                   | 10,738 | 10,761 | 10,785 | 10,808 | 1570                | 16,336                                   | 16,360 | 16,383 | 16,406 | 16,430 |
| 1110                | 10,832                                   | 10,856 | 10,879 | 10,903 | 10,926 | 1580                | 16,453                                   | 16,476 | 16,500 | 16,523 | 16,546 |
| 1120                | 10,950                                   | 10,974 | 10,997 | 11,021 | 11,044 | 1590                | 16,569                                   | 16,593 | 16,616 | 16,639 | 16,662 |
| 1130                | 11,068                                   | 11,092 | 11,116 | 11,140 | 11,163 | 1600                | 16,685                                   | —      | —      | —      | —      |
| 1140                | 11,187                                   | 11,211 | 11,235 | 11,259 | 11,282 |                     |                                          |        |        |        |        |

Таблица 8.22. Стандартная градуировочная таблица термопары Pt + 6 % Rh — Pt + 30 % Rh [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура,  $^\circ\text{C}$  (МПТШ-68); температура свободных концов  $0^\circ\text{C}$ ; предел допускаемых отклонений 0,01 мВ при  $t < 300^\circ\text{C}$  и  $[0,01 + 3,3 \cdot 10^{-5} (t - 300)]$  мВ при  $t > 300^\circ\text{C}$

| $t, ^\circ\text{C}$ | Приращение температуры, $^\circ\text{C}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 0                                        | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    | 35    | 40    | 45    |
| 300                 | 0,443                                    | 0,459 | 0,475 | 0,491 | 0,508 | 0,525 | 0,542 | 0,559 | 0,577 | 0,595 |
| 350                 | 0,613                                    | 0,632 | 0,650 | 0,669 | 0,688 | 0,707 | 0,727 | 0,747 | 0,767 | 0,787 |
| 400                 | 0,808                                    | 0,829 | 0,850 | 0,871 | 0,893 | 0,915 | 0,938 | 0,960 | 0,983 | 1,006 |
| 450                 | 1,029                                    | 1,053 | 1,076 | 1,100 | 1,124 | 1,148 | 1,173 | 1,198 | 1,223 | 1,248 |
| 500                 | 1,274                                    | 1,299 | 1,325 | 1,351 | 1,377 | 1,403 | 1,430 | 1,457 | 1,484 | 1,512 |



| $t, ^\circ\text{C}$ | Приращение температуры, $^\circ\text{C}$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 0                                        | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     |
| 550                 | 1,540                                    | 1,568  | 1,596  | 1,625  | 1,653  | 1,682  | 1,710  | 1,740  | 1,770  | 1,800  |
| 600                 | 1,830                                    | 1,860  | 1,891  | 1,922  | 1,953  | 1,984  | 2,015  | 2,046  | 2,078  | 2,110  |
| 650                 | 2,142                                    | 2,174  | 2,207  | 2,239  | 2,272  | 2,305  | 2,339  | 2,373  | 2,407  | 2,441  |
| 700                 | 2,476                                    | 2,511  | 2,546  | 2,581  | 2,616  | 2,651  | 2,687  | 2,723  | 2,759  | 2,795  |
| 750                 | 2,832                                    | 2,868  | 2,906  | 2,943  | 2,981  | 3,019  | 3,057  | 3,095  | 3,132  | 3,170  |
| 800                 | 3,208                                    | 3,247  | 3,287  | 3,327  | 3,367  | 3,407  | 3,447  | 3,487  | 3,527  | 3,567  |
| 850                 | 3,608                                    | 3,649  | 3,690  | 3,731  | 3,773  | 3,815  | 3,856  | 3,898  | 3,940  | 3,982  |
| 900                 | 4,025                                    | 4,068  | 4,111  | 4,155  | 4,198  | 4,241  | 4,285  | 4,329  | 4,373  | 4,417  |
| 950                 | 4,462                                    | 4,507  | 4,552  | 4,597  | 4,642  | 4,687  | 4,732  | 4,778  | 4,824  | 4,870  |
| 1000                | 4,916                                    | 4,962  | 5,009  | 5,055  | 5,102  | 5,149  | 5,196  | 5,243  | 5,291  | 5,339  |
| 1050                | 5,387                                    | 5,436  | 5,484  | 5,533  | 5,582  | 5,631  | 5,680  | 5,729  | 5,778  | 5,828  |
| 1100                | 5,878                                    | 5,928  | 5,978  | 6,028  | 6,078  | 6,129  | 6,180  | 6,231  | 6,282  | 6,333  |
| 1150                | 6,384                                    | 6,435  | 6,487  | 6,538  | 6,590  | 6,642  | 6,694  | 6,747  | 6,799  | 6,852  |
| 1200                | 6,904                                    | 6,957  | 7,010  | 7,064  | 7,117  | 7,170  | 7,224  | 7,277  | 7,331  | 7,385  |
| 1250                | 7,439                                    | 7,493  | 7,547  | 7,601  | 7,655  | 7,709  | 7,764  | 7,819  | 7,873  | 7,928  |
| 1300                | 7,982                                    | 8,037  | 8,092  | 8,147  | 8,203  | 8,259  | 8,315  | 8,371  | 8,427  | 8,483  |
| 1350                | 8,539                                    | 8,595  | 8,652  | 8,708  | 8,765  | 8,822  | 8,878  | 8,935  | 8,992  | 9,048  |
| 1400                | 9,106                                    | 9,162  | 9,220  | 9,276  | 9,334  | 9,390  | 9,448  | 9,505  | 9,563  | 9,621  |
| 1450                | 9,679                                    | 9,737  | 9,795  | 9,853  | 9,911  | 9,969  | 10,027 | 10,085 | 10,143 | 10,201 |
| 1500                | 10,259                                   | 10,318 | 10,376 | 10,434 | 10,493 | 10,551 | 10,610 | 10,668 | 10,727 | 10,785 |
| 1550                | 10,844                                   | 10,902 | 10,961 | 11,019 | 11,078 | 11,136 | 11,195 | 11,253 | 11,312 | 11,370 |
| 1600                | 11,429                                   | 11,487 | 11,546 | 11,604 | 11,663 | 11,721 | 11,780 | 11,838 | 11,897 | 11,955 |
| 1650                | 12,014                                   | 12,072 | 12,131 | 12,190 | 12,249 | 12,308 | 12,367 | 12,426 | 12,485 | 12,544 |
| 1700                | 12,603                                   | 12,662 | 12,721 | 12,780 | 12,839 | 12,898 | 12,957 | 13,016 | 13,075 | 13,134 |
| 1750                | 13,193                                   | 13,252 | 13,310 | 13,369 | 13,427 | 13,486 | 13,544 | 13,603 | 13,661 | 13,720 |
| 1800                | 13,778                                   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |

Таблица 8.23. Стандартная градуировочная таблица термопары W + 5 % Re — W + 20 % Re [58]  
(градуировочная характеристика \*)

Термо-ЭДС, мВ; температура,  $^\circ\text{C}$  (МПТШ—68); температура свободных концов  $0^\circ\text{C}$ ; предел допускаемых отклонений 0,08 мВ при  $t < 1000^\circ\text{C}$  и  $[0,08 + 4,0 \cdot 10^{-5} (t - 1000)]$  мВ при  $t > 1000^\circ\text{C}$

| $t, ^\circ\text{C}$ | 0      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0                   | 0,000  | 0,124  | 0,250  | 0,378  | 0,508  | 0,640  | 0,774  | 0,910  | 1,048  | 1,188  |
| 100                 | 1,330  | 1,475  | 1,622  | 1,771  | 1,922  | 2,075  | 2,230  | 2,387  | 2,546  | 2,707  |
| 200                 | 2,869  | 3,032  | 3,195  | 3,359  | 3,523  | 3,688  | 3,853  | 4,019  | 4,185  | 4,352  |
| 300                 | 4,519  | 4,687  | 4,855  | 5,024  | 5,193  | 5,362  | 5,531  | 5,700  | 5,869  | 6,039  |
| 400                 | 6,209  | 6,379  | 6,549  | 6,719  | 6,889  | 7,059  | 7,229  | 7,399  | 7,569  | 7,739  |
| 500                 | 7,909  | 8,078  | 8,247  | 8,416  | 8,585  | 8,754  | 8,923  | 9,092  | 9,261  | 9,430  |
| 600                 | 9,598  | 9,765  | 9,933  | 10,101 | 10,269 | 10,437 | 10,605 | 10,772 | 10,939 | 11,106 |
| 700                 | 11,273 | 11,440 | 11,606 | 11,772 | 11,938 | 12,104 | 12,269 | 12,434 | 12,599 | 12,764 |
| 800                 | 12,929 | 13,093 | 13,257 | 13,421 | 13,584 | 13,747 | 13,910 | 14,072 | 14,234 | 14,395 |
| 900                 | 14,556 | 14,716 | 14,876 | 15,035 | 15,194 | 15,352 | 15,510 | 15,667 | 15,824 | 15,980 |
| 1000                | 16,136 | 16,291 | 16,446 | 16,600 | 16,754 | 16,907 | 17,060 | 17,212 | 17,364 | 17,515 |
| 1100                | 17,666 | 17,816 | 17,966 | 18,115 | 18,264 | 18,412 | 18,560 | 18,707 | 18,854 | 19,000 |
| 1200                | 19,146 | 19,291 | 19,436 | 19,580 | 19,724 | 19,867 | 20,010 | 20,152 | 20,294 | 20,435 |
| 1300                | 20,576 | 20,716 | 20,856 | 20,996 | 21,135 | 21,274 | 21,413 | 21,551 | 21,689 | 21,826 |
| 1400                | 21,963 | 22,099 | 22,235 | 22,370 | 22,505 | 22,639 | 22,773 | 22,906 | 23,039 | 23,171 |
| 1500                | 23,303 | 23,434 | 23,565 | 23,695 | 23,825 | 23,954 | 24,083 | 24,211 | 24,338 | 24,464 |
| 1600                | 24,590 | 24,715 | 24,840 | 24,964 | 25,088 | 25,211 | 25,334 | 25,456 | 25,578 | 25,699 |
| 1700                | 25,820 | 25,940 | 26,060 | 26,179 | 26,298 | 26,416 | 26,534 | 26,651 | 26,768 | 26,884 |
| 1800                | 26,999 | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |

\* В [58] приведены также градуировочные характеристики 2 и 3, незначительно отличающиеся от характеристики 1.

Таблица 8.24. Градуировочная таблица термопары W + 5 % Re — W + 20 % Re для диапазона температур от 1800 до 2500° C [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C (МПТШ—68); температура свободных концов 0° C

| t, °C | Приращение температуры, °C |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 0                          | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     |
| 1800  | 26,999                     | 27,113 | 27,226 | 27,339 | 27,451 | 27,563 | 27,675 | 27,786 | 27,897 | 28,007 |
| 1900  | 28,117                     | 28,226 | 28,334 | 28,442 | 28,549 | 28,656 | 28,762 | 28,867 | 28,971 | 29,074 |
| 2000  | 29,177                     | 29,279 | 29,381 | 29,483 | 29,584 | 29,685 | 29,786 | 29,886 | 29,986 | 30,086 |
| 2100  | 30,185                     | 30,284 | 30,382 | 30,479 | 30,575 | 30,670 | 30,765 | 30,859 | 30,952 | 31,044 |
| 2200  | 31,136                     | 31,227 | 31,318 | 31,408 | 31,498 | 31,587 | 31,676 | 31,764 | 31,852 | 31,939 |
| 2300  | 32,026                     | 32,112 | 32,197 | 32,281 | 32,365 | 32,448 | 32,531 | 32,613 | 32,695 | 32,776 |
| 2400  | 32,857                     | 32,937 | 33,017 | 33,096 | 33,175 | 33,253 | 33,331 | 33,408 | 33,485 | 33,561 |
| 2500  | 33,636                     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |

Таблица 8.25. Градуировочная таблица термо-ЭДС некоторых высокотемпературных термопар

Термо-ЭДС, мВ; температура, °C; температура свободных концов термопар 0° C; нихросил: Ni, 14,2 % Cr, 1,4 % Si; нисил: Si, 4,4 % Si, 0,1 % Mg

| t, °C | Никель —<br>нихром [50] | Нихросил —<br>нисил [10] | Ir — Ir +<br>10% Ru [59] | Ir + 10% Ru —<br>Ir + 10% Rh [59] | Ir — Ir + 60% Rh [26] | W — Mo [50] | t, °C | Никель —<br>нихром [50] | Нихросил —<br>нисил [10] | Ir — Ir +<br>10% Ru [59] | Ir + 10% Ru —<br>Ir + 10% Rh [59] | Ir — Ir + 60% Rh [26] | W — Mo [50] |
|-------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|-------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|
| 100   | 3,7                     | 2,77                     | —                        | —                                 | 0,37                  | 0,4         | 1100  | 40,6                    | 40,08                    | 2,73                     | 6,83                              | 5,85                  | —           |
| 200   | 7,8                     | 5,91                     | —                        | —                                 | 0,82                  | —           | 1200  | —                       | 43,84                    | 3,00                     | 7,38                              | 6,39                  | —           |
| 300   | 11,8                    | 9,34                     | —                        | 1,66                              | 1,33                  | —           | 1300  | —                       | 47,50                    | 3,24                     | 7,91                              | 6,92                  | —0,285      |
| 400   | 15,1                    | 12,97                    | —                        | —                                 | 1,89                  | —           | 1400  | —                       | —                        | 3,47                     | 8,41                              | 7,46                  | +0,299      |
| 500   | 18,4                    | 16,74                    | —                        | —                                 | 2,46                  | —           | 1500  | —                       | —                        | 3,68                     | 8,89                              | 8,01                  | 0,937       |
| 600   | 21,9                    | 20,61                    | —                        | 3,64                              | 3,05                  | —           | 1600  | —                       | —                        | 3,87                     | 9,35                              | 8,58                  | 1,63        |
| 700   | 25,5                    | 24,53                    | —                        | —                                 | 3,63                  | —           | 1700  | —                       | —                        | 4,09                     | 9,81                              | 9,16                  | 2,38        |
| 800   | 29,2                    | 28,46                    | —                        | —                                 | 4,20                  | —           | 1800  | —                       | —                        | 4,19                     | 10,26                             | 9,75                  | 3,14        |
| 900   | 33,0                    | 32,37                    | —                        | —                                 | 4,76                  | —           | 2000  | —                       | —                        | 6,5*                     | —                                 | 11,00                 | —           |
| 1000  | 36,7                    | 36,25                    | 2,45                     | 6,24                              | 5,31                  | —           |       |                         |                          |                          |                                   |                       |             |

\* Термо-ЭДС при температуре 2300° C.

## 8.6. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Действие конденсационных термометров основано на температурной зависимости давления насыщенных паров жидкости. Термометрические вещества — обычно жидкие газы: гелий, водород, неон, аргон, кислород и др. Для определения температуры по измеренному давлению пользуются таблицами или эмпирическими формулами. Диапазон измерения температуры конденсационными термометрами ограничен снизу температурой затвердевания термометрической жидкости, а сверху — температурой критической точки. Высокоточные термометры позволяют измерять температуру с погрешностью не больше 0,001 К.

Обычно давление паров определяют по показаниям ртутного манометра. При этом отсчеты давления по высоте столба ртути зависят от местного ускорения свободного падения и температуры ртути. В случае прецизионных измерений вводят поправки к барометрической высоте  $h$ , м:

гравитационная поправка

$$\Delta h = \frac{g - 9,80665}{9,80665} h;$$

температурная поправка

$$\Delta h = -\alpha \Delta t h,$$

где  $g$  — значение местного ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Delta t$  — разность между температурой ртути и температурой, указанной в табл. 8.27—8.34, °C;  $\alpha$  — коэффициент, который для ртутного манометра со стеклянной шкалой равен  $1,72 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и для манометра с латунной шкалой  $1,63 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [47].

Вопросы термометрии по давлению паров жидкостей рассмотрены в [47, 61]. Важная для низкотемпературной термометрии методика измерения давления паров гелия обсуждается в [48, 62, 63].

Таблица 8.26. Рабочие интервалы некоторых конденсационных термометров

| ТЖ   | <sup>3</sup> He | <sup>4</sup> He | e—H <sub>2</sub> | n—H <sub>2</sub> | Ne       | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CF <sub>4</sub> |
|------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------|----------------|----------------|-----------------|
| T, К | 0,2—3,316       | 0,5—5,195       | 13,81—23         | 13,96—30         | 24,56—40 | 63—84          | 54,4—94        | 90—173          |

Примечание. ТЖ — термометрическая жидкость; e — H<sub>2</sub> — равновесный водород; n — H<sub>2</sub> — нормальный водород (определение см. в примечаниях к табл. 8.1 и 8.4).

Таблица 8.27. Зависимость между давлением насыщенных паров <sup>3</sup>He и температурой T<sub>76</sub>

| T, К         | Приращение температуры, К |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|              | 0,00                      | 0,01    | 0,02    | 0,03    | 0,04    | 0,05    | 0,06    | 0,07    | 0,08    | 0,09    |
| Давление, Па |                           |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 0,2          | 0,00147                   | 0,00298 | 0,00569 | 0,01030 | 0,01783 | 0,02964 | 0,04754 | 0,07385 | 0,11150 | 0,16406 |
| 0,3          | 0,2358                    | 0,3320  | 0,4584  | 0,6220  | 0,8305  | 1,0928  | 1,4186  | 1,8187  | 2,3050  | 2,8902  |
| 0,4          | 3,588                     | 4,414   | 5,383   | 6,512   | 7,820   | 9,324   | 11,045  | 13,002  | 15,217  | 17,712  |
| 0,5          | 20,510                    | 23,633  | 27,106  | 30,955  | 35,203  | 39,877  | 45,003  | 50,608  | 56,718  | 63,363  |
| 0,6          | 70,569                    | 78,365  | 86,780  | 95,842  | 105,581 | 116,025 | 127,205 | 139,150 | 151,891 | 165,456 |
| 0,7          | 179,88                    | 195,18  | 211,40  | 228,57  | 246,72  | 265,87  | 286,05  | 307,31  | 329,66  | 353,15  |
| 0,8          | 377,79                    | 403,62  | 430,67  | 458,97  | 488,55  | 519,44  | 551,67  | 585,27  | 620,27  | 656,70  |
| 0,9          | 694,59                    | 733,98  | 774,88  | 817,32  | 861,35  | 906,98  | 954,25  | 1003,19 | 1053,82 | 1106,17 |

Давление, 10<sup>3</sup> Па

|     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1,0 | 1,160  | 1,216  | 1,274  | 1,333  | 1,395  | 1,458  | 1,523  | 1,590  | 1,660  | 1,731   |
| 1,1 | 1,804  | 1,879  | 1,957  | 2,036  | 2,118  | 2,201  | 2,287  | 2,376  | 2,466  | 2,559   |
| 1,2 | 2,654  | 2,751  | 2,851  | 2,953  | 3,058  | 3,165  | 3,274  | 3,386  | 3,501  | 3,618   |
| 1,3 | 3,737  | 3,860  | 3,984  | 4,112  | 4,242  | 4,375  | 4,510  | 4,649  | 4,790  | 4,934   |
| 1,4 | 5,081  | 5,230  | 5,383  | 5,538  | 5,696  | 5,858  | 6,022  | 6,189  | 6,360  | 6,533   |
| 1,5 | 6,709  | 6,889  | 7,072  | 7,258  | 7,447  | 7,639  | 7,834  | 8,033  | 8,235  | 8,440   |
| 1,6 | 8,649  | 8,861  | 9,076  | 9,295  | 9,517  | 9,743  | 9,972  | 10,205 | 10,441 | 10,681  |
| 1,7 | 10,924 | 11,171 | 11,421 | 11,675 | 11,933 | 12,195 | 12,460 | 12,729 | 13,001 | 13,278  |
| 1,8 | 13,558 | 13,842 | 14,130 | 14,422 | 14,718 | 15,017 | 15,321 | 15,628 | 15,940 | 16,256  |
| 1,9 | 16,575 | 16,899 | 17,227 | 17,559 | 17,895 | 18,235 | 18,579 | 18,928 | 19,280 | 19,637  |
| 2,0 | 19,999 | 20,364 | 20,734 | 21,108 | 21,487 | 21,870 | 22,257 | 22,649 | 23,046 | 23,446  |
| 2,1 | 23,852 | 24,261 | 24,676 | 25,095 | 25,518 | 25,946 | 26,379 | 26,816 | 27,259 | 27,705  |
| 2,2 | 28,157 | 28,613 | 29,074 | 29,540 | 30,011 | 30,486 | 30,967 | 31,452 | 31,942 | 32,438  |
| 2,3 | 32,938 | 33,443 | 33,953 | 34,468 | 34,988 | 35,514 | 36,044 | 36,580 | 37,120 | 37,666  |
| 2,4 | 38,217 | 38,774 | 39,335 | 39,902 | 40,474 | 41,052 | 41,635 | 42,223 | 42,816 | 43,415  |
| 2,5 | 44,020 | 44,630 | 45,245 | 45,866 | 46,493 | 47,125 | 47,763 | 48,406 | 49,055 | 49,710  |
| 2,6 | 50,370 | 51,037 | 51,709 | 52,386 | 53,070 | 53,759 | 54,455 | 55,156 | 55,863 | 56,576  |
| 2,7 | 57,295 | 58,021 | 58,752 | 59,489 | 60,233 | 60,982 | 61,738 | 62,500 | 63,268 | 64,043  |
| 2,8 | 64,824 | 65,611 | 66,405 | 67,205 | 68,011 | 68,824 | 69,644 | 70,470 | 71,302 | 72,141  |
| 2,9 | 72,987 | 73,840 | 74,699 | 75,565 | 76,438 | 77,318 | 78,205 | 79,098 | 79,999 | 80,907  |
| 3,0 | 81,821 | 82,743 | 83,672 | 84,608 | 85,551 | 86,502 | 87,460 | 88,425 | 89,398 | 90,378  |
| 3,1 | 91,366 | 92,361 | 93,364 | 94,375 | 95,393 | 96,419 | 97,453 | 98,495 | 99,544 | 100,602 |
| 3,2 | 101,67 | 102,74 | 103,82 | 104,91 | 106,01 | 107,12 | 108,23 | 109,36 | 110,49 | 111,63  |
| 3,3 | 112,78 | 113,94 |        |        |        |        |        |        |        |         |

Зависимость между давлением  $p$ , Па, насыщенных паров <sup>3</sup>He и  $T_{76}$ , К, в области от 0,5 до 3,3162 К описывается уравнением [23]

$$\ln p = \sum_{k=1}^4 a_k T_{76}^k + b \ln T_{76}.$$

Это уравнение справедливо в области от 0,5 до 0,2 К при замене  $T_{76}$  на  $T$ ;  $a_{-1} = -2,50943$  К;  $a_0 = 9,70876$ ;  $a_1 = -0,304433$  К<sup>-1</sup>;  $a_2 = 0,210429$  К<sup>-2</sup>;  $a_3 = -0,0545145$  К<sup>-3</sup>;  $a_4 = 0,0056067$  К<sup>-4</sup>;  $b = 2,25484$ .

Т а б л и ц а 8.28. Зависимость между давлением насыщенных паров  $^4\text{He}$  и температурой  $T_{76}$

| T, К                | Приращение температуры, К |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                     | 0,00                      | 0,01    | 0,02    | 0,03    | 0,04    | 0,05    | 0,06    | 0,07    | 0,08    | 0,09    |
| Давление, Па        |                           |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 0,5                 | 0,00206                   | 0,00287 | 0,00396 | 0,00539 | 0,00726 | 0,00969 | 0,01280 | 0,01676 | 0,02176 | 0,02803 |
| 0,6                 | 0,0358                    | 0,0454  | 0,0573  | 0,0716  | 0,0891  | 0,1101  | 0,1353  | 0,1653  | 0,2009  | 0,2429  |
| 0,7                 | 0,2922                    | 0,3500  | 0,4172  | 0,4952  | 0,5854  | 0,6892  | 0,8082  | 0,9444  | 1,0995  | 1,2757  |
| 0,8                 | 1,475                     | 1,700   | 1,954   | 2,239   | 2,558   | 2,914   | 3,310   | 3,751   | 4,240   | 4,782   |
| 0,9                 | 5,379                     | 6,038   | 6,762   | 7,556   | 8,427   | 9,379   | 10,418  | 11,550  | 12,781  | 14,119  |
| 1,0                 | 15,570                    | 17,140  | 18,839  | 20,672  | 22,649  | 24,777  | 27,066  | 29,523  | 32,159  | 34,983  |
| 1,1                 | 38,005                    | 41,234  | 44,682  | 48,359  | 52,276  | 56,445  | 60,877  | 65,585  | 70,580  | 75,875  |
| 1,2                 | 81,483                    | 87,418  | 93,693  | 100,322 | 107,318 | 114,698 | 122,474 | 130,663 | 139,279 | 148,339 |
| 1,3                 | 157,86                    | 167,85  | 178,34  | 189,33  | 200,85  | 212,92  | 225,54  | 238,74  | 252,54  | 266,96  |
| 1,4                 | 282,00                    | 297,70  | 314,07  | 331,13  | 348,90  | 367,40  | 386,65  | 406,67  | 427,48  | 449,10  |
| 1,5                 | 471,54                    | 494,84  | 519,02  | 544,08  | 570,06  | 596,98  | 624,85  | 653,71  | 683,56  | 714,44  |
| 1,6                 | 746,36                    | 779,35  | 813,43  | 848,62  | 884,95  | 922,43  | 961,08  | 1000,94 | 1042,02 | 1084,35 |
| Давление, $10^3$ Па |                           |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 1,7                 | 1,128                     | 1,173   | 1,219   | 1,267   | 1,315   | 1,366   | 1,417   | 1,470   | 1,525   | 1,581   |
| 1,8                 | 1,638                     | 1,697   | 1,758   | 1,820   | 1,884   | 1,949   | 2,016   | 2,084   | 2,154   | 2,226   |
| 1,9                 | 2,299                     | 2,374   | 2,451   | 2,530   | 2,610   | 2,692   | 2,776   | 2,862   | 2,949   | 3,038   |
| 2,0                 | 3,129                     | 3,222   | 3,317   | 3,413   | 3,512   | 3,612   | 3,714   | 3,818   | 3,924   | 4,031   |
| 2,1                 | 4,141                     | 4,252   | 4,365   | 4,480   | 4,597   | 4,715   | 4,836   | 4,958   | 5,082   | 5,207   |
| 2,2                 | 5,335                     | 5,465   | 5,597   | 5,731   | 5,867   | 6,006   | 6,146   | 6,289   | 6,434   | 6,581   |
| 2,3                 | 6,730                     | 6,882   | 7,036   | 7,192   | 7,351   | 7,512   | 7,676   | 7,842   | 8,010   | 8,181   |
| 2,4                 | 8,354                     | 8,530   | 8,708   | 8,889   | 9,072   | 9,258   | 9,447   | 9,638   | 9,832   | 10,029  |
| 2,5                 | 10,228                    | 10,430  | 10,634  | 10,842  | 11,052  | 11,265  | 11,481  | 11,699  | 11,921  | 12,145  |
| 2,6                 | 12,372                    | 12,602  | 12,835  | 13,071  | 13,310  | 13,552  | 13,797  | 14,045  | 14,296  | 14,550  |
| 2,7                 | 14,807                    | 15,067  | 15,330  | 15,597  | 15,867  | 16,139  | 16,415  | 16,695  | 16,977  | 17,263  |
| 2,8                 | 17,552                    | 17,844  | 18,140  | 18,438  | 18,741  | 19,046  | 19,355  | 19,668  | 19,984  | 20,303  |
| 2,9                 | 20,625                    | 20,952  | 21,281  | 21,615  | 21,951  | 22,292  | 22,635  | 22,983  | 23,334  | 23,689  |
| 3,0                 | 24,047                    | 24,409  | 24,775  | 25,144  | 25,517  | 25,894  | 26,275  | 26,659  | 27,048  | 27,440  |
| 3,1                 | 27,835                    | 28,235  | 28,639  | 29,046  | 29,458  | 29,873  | 30,293  | 30,716  | 31,143  | 31,575  |
| 3,2                 | 32,010                    | 32,449  | 32,893  | 33,340  | 33,792  | 34,248  | 34,708  | 35,172  | 35,640  | 36,113  |
| 3,3                 | 36,590                    | 37,071  | 37,556  | 38,046  | 38,540  | 39,038  | 39,541  | 40,047  | 40,559  | 41,075  |
| 3,4                 | 41,595                    | 42,119  | 42,648  | 43,182  | 43,720  | 44,262  | 44,810  | 45,361  | 45,917  | 46,478  |
| 3,5                 | 47,044                    | 47,614  | 48,189  | 48,768  | 49,352  | 49,941  | 50,534  | 51,133  | 51,736  | 52,344  |
| 3,6                 | 52,956                    | 53,574  | 54,196  | 54,823  | 55,455  | 56,092  | 56,734  | 57,381  | 58,033  | 58,689  |
| 3,7                 | 59,351                    | 60,018  | 60,690  | 61,367  | 62,048  | 62,735  | 63,427  | 64,125  | 64,827  | 65,535  |
| 3,8                 | 66,247                    | 66,965  | 67,688  | 68,417  | 69,150  | 69,889  | 70,634  | 71,383  | 72,138  | 72,898  |
| 3,9                 | 73,664                    | 74,435  | 75,211  | 75,993  | 76,780  | 77,573  | 78,371  | 79,175  | 79,984  | 80,799  |
| 4,0                 | 81,620                    | 82,446  | 83,277  | 84,115  | 84,958  | 85,806  | 86,661  | 87,521  | 88,387  | 89,258  |
| 4,1                 | 90,136                    | 91,019  | 91,908  | 92,803  | 93,704  | 94,610  | 95,523  | 96,442  | 97,366  | 98,297  |
| 4,2                 | 99,233                    | 100,176 | 101,125 | 102,080 | 103,040 | 104,008 | 104,981 | 105,960 | 106,946 | 107,938 |
| 4,3                 | 108,94                    | 109,94  | 110,95  | 111,97  | 112,99  | 114,02  | 115,06  | 116,10  | 117,15  | 118,21  |
| 4,4                 | 119,27                    | 120,34  | 121,41  | 122,50  | 123,58  | 124,68  | 125,78  | 126,89  | 128,01  | 129,13  |
| 4,5                 | 130,26                    | 131,39  | 132,54  | 133,69  | 134,84  | 136,01  | 137,18  | 138,36  | 139,54  | 140,73  |
| 4,6                 | 141,93                    | 143,14  | 144,35  | 145,57  | 146,80  | 148,03  | 149,27  | 150,52  | 151,78  | 153,04  |
| 4,7                 | 154,31                    | 155,59  | 156,88  | 158,17  | 159,47  | 160,78  | 162,09  | 163,41  | 164,75  | 166,08  |
| 4,8                 | 167,43                    | 168,78  | 170,14  | 171,51  | 172,89  | 174,27  | 175,67  | 177,07  | 178,47  | 179,89  |
| 4,9                 | 181,31                    | 182,74  | 184,18  | 185,63  | 187,09  | 188,55  | 190,03  | 191,51  | 193,00  | 194,50  |
| 5,0                 | 196,00                    | 197,52  | 199,04  | 200,58  | 202,12  | 203,67  | 205,24  | 206,81  | 208,39  | 209,98  |
| 5,1                 | 211,58                    | 213,20  | 214,82  | 216,45  | 218,10  | 219,76  | 221,43  | 223,12  | 224,82  | 226,54  |

Зависимость между давлением  $p$ , Па, насыщенных паров  $^4\text{He}$  и  $T_{76}$ , К, в области от 0,5 до 2,1768 К ( $\lambda$ -точка) описывается уравнением [23]

$$\ln p = \sum_{k=-1}^6 a_k T_{76}^k,$$

где  $a_{-1} = -7,41816$ ;  $a_0 = 5,42128$ ;  $a_1 = 9,903203 \text{ К}^{-1}$ ;  $a_2 = -9,617095 \text{ К}^{-2}$ ;  $a_3 = 6,804602 \text{ К}^{-3}$ ;  $a_4 = -3,0154606 \text{ К}^{-4}$ ;  $a_5 = 0,7461357 \text{ К}^{-5}$ ;  $a_6 = -0,0791791 \text{ К}^{-6}$ .

В области от 2,1768 К до критической температуры  $T_{\text{кр}} = 5,1952 \text{ К}$

$$\ln p = \sum_{k=-1}^8 a_k (T_{76}/T_{\text{кр}})^k + b (1 - T_{76}/T_{\text{кр}})^{1,9},$$

где  $a_{-1} = -30,93285$ ;  $a_0 = 392,47361$ ;  $a_1 = -2328,04587$ ;  $a_2 = 8111,30347$ ;  $a_3 = -17809,80901$ ;  $a_4 = 25766,52747$ ;  $a_5 = -24601,4$ ;  $a_6 = 14944,65142$ ;  $a_7 = -5240,36518$ ;  $a_8 = 807,93168$ ;  $b = 14,53333$ .

Таблица 8.29. Зависимость между давлением насыщенных паров, равновесного водорода ( $10^3$  Па) и  $T_{68}^*$

| T, К | Приращение температуры, К |        |         |         |         |
|------|---------------------------|--------|---------|---------|---------|
|      | 0,0                       | 0,2    | 0,4     | 0,6     | 0,8     |
| 14,0 | 7,842                     | 8,773  | 9,787   | 10,888  | 12,082  |
| 15,0 | 13,373                    | 14,765 | 16,266  | 17,879  | 19,609  |
| 16,0 | 21,463                    | 23,446 | 25,562  | 27,818  | 30,220  |
| 17,0 | 32,772                    | 35,481 | 38,352  | 41,392  | 44,606  |
| 18,0 | 48,000                    | 51,580 | 55,351  | 59,321  | 63,495  |
| 19,0 | 67,879                    | 72,480 | 77,303  | 82,355  | 87,641  |
| 20,0 | 93,169                    | 98,945 | 104,974 | 111,263 | 117,819 |
| 21,0 | 124,65                    | 131,75 | 139,15  | 146,83  | 154,82  |
| 22,0 | 163,11                    | 171,71 | 180,62  | 189,87  | 199,44  |
| 23,0 | 209,35                    | —      | —       | —       | —       |

\* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.30. Зависимость между давлением насыщенных паров нормального водорода ( $10^3$  Па) и  $T_{68}^*$

| T, К | Приращение температуры, К |        |         |         |         |
|------|---------------------------|--------|---------|---------|---------|
|      | 0,0                       | 0,2    | 0,4     | 0,6     | 0,8     |
| 14,0 | 7,384                     | 8,271  | 9,238   | 10,289  | 11,430  |
| 15,0 | 12,665                    | 13,999 | 15,437  | 16,984  | 18,646  |
| 16,0 | 20,428                    | 22,335 | 24,373  | 26,546  | 28,862  |
| 17,0 | 31,325                    | 33,940 | 36,715  | 39,654  | 42,763  |
| 18,0 | 46,049                    | 49,517 | 53,173  | 57,023  | 61,073  |
| 19,0 | 65,330                    | 69,798 | 74,486  | 79,397  | 84,540  |
| 20,0 | 89,920                    | 95,543 | 101,415 | 107,543 | 113,934 |
| 21,0 | 120,59                    | 127,53 | 134,74  | 142,24  | 150,04  |
| 22,0 | 158,14                    | 166,54 | 175,26  | 184,29  | 193,66  |
| 23,0 | 203,35                    | 213,39 | 223,17  | 234,50  | 245,59  |
| 24,0 | 257,05                    | 268,88 | 281,09  | 293,68  | 306,67  |
| 25,0 | 320,05                    | 333,84 | 348,05  | 362,67  | 377,72  |
| 26,0 | 393,20                    | 409,12 | 425,49  | 442,31  | 459,59  |
| 27,0 | 477,33                    | 495,55 | 514,25  | 533,44  | 553,13  |
| 28,0 | 573,31                    | 594,01 | 615,22  | 636,96  | 659,22  |
| 29,0 | 682,02                    | 705,37 | 729,27  | 753,72  | 778,75  |
| 30,0 | 804,35                    | —      | —       | —       | —       |

\* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.31. Зависимость между давлением насыщенных паров неона ( $10^3$  Па) и  $T_{68}^*$

| T, К | Приращение температуры, К |         |         |         |         |
|------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 0,0                       | 0,2     | 0,4     | 0,6     | 0,8     |
| 24,0 | —                         | —       | —       | 44,022  | 47,356  |
| 25,0 | 50,882                    | 54,605  | 58,534  | 62,676  | 67,037  |
| 26,0 | 71,626                    | 76,449  | 81,515  | 86,831  | 92,404  |
| 27,0 | 98,243                    | 104,355 | 110,747 | 117,429 | 124,408 |
| 28,0 | 131,69                    | 139,29  | 147,21  | 155,45  | 164,04  |
| 29,0 | 172,97                    | 182,25  | 191,89  | 201,91  | 212,31  |
| 30,0 | 223,09                    | 234,27  | 245,85  | 257,84  | 270,26  |
| 31,0 | 283,11                    | 296,40  | 310,13  | 324,32  | 338,98  |
| 32,0 | 354,11                    | 369,72  | 385,82  | 402,43  | 419,54  |
| 33,0 | 437,18                    | 455,34  | 474,05  | 493,30  | 513,10  |
| 34,0 | 533,47                    | 554,42  | 575,95  | 598,08  | 620,82  |
| 35,0 | 644,16                    | 668,14  | 692,75  | 718,00  | 743,91  |
| 36,0 | 770,48                    | 797,74  | 825,67  | 854,31  | 883,66  |
| 37,0 | 913,73                    | 944,52  | 976,07  | 1008,36 | 1041,42 |
| 38,0 | 1075,26                   | 1109,89 | 1145,33 | 1181,57 | 1218,65 |
| 39,0 | 1256,56                   | 1295,33 | 1334,96 | 1375,47 | 1416,88 |
| 40,0 | 1459,19                   | —       | —       | —       | —       |

\* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.32. Зависимость между давлением насыщенных паров азота и  $T_{68}^*$

| T, К | Приращение температуры, К |         |         |         |         |
|------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 0,0                       | 0,2     | 0,4     | 0,6     | 0,8     |
| 45,0 | 66,408                    | 71,987  | 77,979  | 84,411  | 91,310  |
| 46,0 | 98,705                    | 106,627 | 115,109 | 124,183 | 133,887 |
| 47,0 | 144,26                    | 155,33  | 167,15  | 179,76  | 193,20  |
| 48,0 | 207,52                    | 222,77  | 239,00  | 256,27  | 274,62  |
| 49,0 | 294,13                    | 314,84  | 336,83  | 360,16  | 384,89  |
| 50,0 | 411,11                    | 438,88  | 468,29  | 499,40  | 532,32  |
| 51,0 | 567,12                    | 603,90  | 642,75  | 683,77  | 727,05  |
| 52,0 | 772,72                    | 820,87  | 871,61  | 925,07  | 981,37  |

Давление, Па

Давление,  $10^3$  Па

|      |        |        |         |         |         |
|------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 53,0 | 1,041  | 1,103  | 1,169   | 1,237   | 1,310   |
| 54,0 | 1,386  | 1,466  | 1,550   | 1,638   | 1,730   |
| 55,0 | 1,827  | 1,928  | 2,035   | 2,146   | 2,263   |
| 56,0 | 2,385  | 2,512  | 2,646   | 2,785   | 2,931   |
| 57,0 | 3,083  | 3,243  | 3,409   | 3,582   | 3,763   |
| 58,0 | 3,952  | 4,149  | 4,354   | 4,568   | 4,790   |
| 59,0 | 5,022  | 5,264  | 5,515   | 5,777   | 6,049   |
| 60,0 | 6,332  | 6,627  | 6,932   | 7,250   | 7,580   |
| 61,0 | 7,923  | 8,279  | 8,649   | 9,032   | 9,430   |
| 62,0 | 9,843  | 10,270 | 10,714  | 11,173  | 11,650  |
| 63,0 | 12,143 | 12,651 | 13,123  | 13,609  | 14,109  |
| 64,0 | 14,624 | 15,154 | 15,699  | 16,260  | 16,838  |
| 65,0 | 17,431 | 18,041 | 18,668  | 19,312  | 19,975  |
| 66,0 | 20,655 | 21,353 | 22,070  | 22,807  | 23,562  |
| 67,0 | 24,338 | 25,134 | 25,950  | 26,787  | 27,646  |
| 68,0 | 28,526 | 29,428 | 30,353  | 31,300  | 32,271  |
| 69,0 | 33,265 | 34,284 | 35,326  | 36,394  | 37,487  |
| 70,0 | 38,605 | 39,750 | 40,921  | 42,118  | 43,344  |
| 71,0 | 44,596 | 45,877 | 47,187  | 48,525  | 49,893  |
| 72,0 | 51,291 | 52,719 | 54,178  | 55,669  | 57,190  |
| 73,0 | 58,744 | 60,331 | 61,950  | 63,603  | 65,290  |
| 74,0 | 67,012 | 68,768 | 70,559  | 72,386  | 74,250  |
| 75,0 | 76,150 | 78,088 | 80,063  | 82,076  | 84,129  |
| 76,0 | 86,220 | 88,351 | 90,522  | 92,733  | 94,986  |
| 77,0 | 97,280 | 99,616 | 101,995 | 104,417 | 106,883 |
| 78,0 | 109,39 | 111,95 | 114,55  | 117,19  | 119,88  |
| 79,0 | 122,62 | 125,41 | 128,24  | 131,12  | 134,05  |
| 80,0 | 137,03 | 140,06 | 143,14  | 146,27  | 149,45  |
| 81,0 | 152,68 | 155,97 | 159,31  | 162,70  | 166,15  |
| 82,0 | 169,65 | 173,20 | 176,82  | 180,48  | 184,21  |
| 83,0 | 187,99 | 191,83 | 195,73  | 199,69  | 203,70  |
| 84,0 | 207,78 | —      | —       | —       | —       |

\* Уравнение, описывающее эту зависимость в области от 63,146 до 84 К, см. в табл. 8.4. В области от 45 до 63 К давление  $p$ , Па, связано с температурой  $T_{68}$ , К, уравнением [65]

$$\ln p = 22,426208 - 820,3673 / T_{68}$$

Таблица 8.33. Зависимость между давлением насыщенных паров кислорода и  $T_{68}^*$

| T, К                | Приращение температуры, К |         |         |         |         |
|---------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                     | 0,0                       | 0,4     | 0,8     | 1,2     | 1,6     |
| Давление, Па        |                           |         |         |         |         |
| 54,0                | —                         | 148,36  | 168,15  | 190,19  | 214,72  |
| 56,0                | 241,95                    | 272,13  | 305,53  | 342,42  | 383,11  |
| 58,0                | 427,91                    | 477,16  | 531,23  | 590,48  | 655,34  |
| 60,0                | 726,21                    | 803,56  | 887,85  | 979,59  | 1079,30 |
| Давление, $10^3$ Па |                           |         |         |         |         |
| 62,0                | 1,188                     | 1,305   | 1,432   | 1,569   | 1,718   |
| 64,0                | 1,878                     | 2,051   | 2,236   | 2,436   | 2,651   |
| 66,0                | 2,881                     | 3,128   | 3,392   | 3,675   | 3,977   |
| 68,0                | 4,300                     | 4,644   | 5,011   | 5,402   | 5,818   |
| 70,0                | 6,259                     | 6,729   | 7,226   | 7,754   | 8,314   |
| 72,0                | 8,906                     | 9,532   | 10,194  | 10,893  | 11,631  |
| 74,0                | 12,409                    | 13,229  | 14,093  | 15,002  | 15,958  |
| 76,0                | 16,964                    | 18,019  | 19,127  | 20,290  | 21,509  |
| 78,0                | 22,786                    | 24,124  | 25,524  | 26,988  | 28,518  |
| 80,0                | 30,118                    | 31,788  | 33,531  | 35,350  | 37,246  |
| 82,0                | 39,222                    | 41,280  | 43,422  | 45,652  | 47,971  |
| 84,0                | 50,382                    | 52,888  | 55,490  | 58,192  | 60,996  |
| 86,0                | 63,904                    | 66,921  | 70,047  | 73,286  | 76,640  |
| 88,0                | 80,113                    | 83,706  | 87,424  | 91,268  | 95,242  |
| 90,0                | 99,348                    | 103,590 | 107,970 | 112,491 | 117,157 |
| 92,0                | 121,97                    | 126,93  | 132,05  | 137,32  | 142,75  |
| 94,0                | 148,35                    | —       | —       | —       | —       |

\* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.34. Зависимость между давлением насыщенных паров  $\text{CF}_4$  (фреон-74) и  $T_{68}$

| T, К                | Приращение температуры, К |        |         |         |         |
|---------------------|---------------------------|--------|---------|---------|---------|
|                     | 0,0                       | 1,0    | 2,0     | 3,0     | 4,0     |
| Давление, Па        |                           |        |         |         |         |
| 90,0                | 119,70                    | 147,49 | 180,76  | 220,41  | 267,46  |
| 95,0                | 323,01                    | 388,31 | 464,77  | 553,90  | 657,42  |
| 100,0               | 777,18                    | 915,22 | 1073,77 | 1255,24 | 1462,26 |
| Давление, $10^3$ Па |                           |        |         |         |         |
| 105,0               | 1,698                     | 1,965  | 2,266   | 2,606   | 2,988   |
| 110,0               | 3,416                     | 3,895  | 4,428   | 5,021   | 5,680   |
| 115,0               | 6,408                     | 7,213  | 8,099   | 9,074   | 10,144  |
| 120,0               | 11,316                    | 12,597 | 13,995  | 15,517  | 17,171  |
| 125,0               | 18,967                    | 20,912 | 23,017  | 25,289  | 27,740  |
| 130,0               | 30,378                    | 33,215 | 36,261  | 39,527  | 43,024  |
| 135,0               | 46,763                    | 50,757 | 55,017  | 59,556  | 64,386  |
| 140,0               | 69,520                    | 74,972 | 80,755  | 86,882  | 93,368  |
| 145,0               | 100,23                    | 107,47 | 115,12  | 123,18  | 131,68  |
| 150,0               | 140,62                    | 150,03 | 159,91  | 170,29  | 181,18  |
| 155,0               | 192,59                    | 204,55 | 217,07  | 230,16  | 243,85  |
| 160,0               | 258,15                    | 273,08 | 288,65  | 304,89  | 321,81  |
| 165,0               | 339,43                    | 357,77 | 376,84  | 396,67  | 417,28  |
| 170,0               | 438,67                    | 460,88 | 483,91  | 507,80  | —       |

В области от 89,6 до 173 К давление  $p$ , Па, связано с температурой  $T_{68}$ , К, уравнением [64]

$$\ln(p/p_{\text{кр}}) = (A_1\tau + A_2\tau^{1,5} + A_3\tau^3 + A_4\tau^6)/T_R,$$

где  $\tau = 1 - T_R$ ;  $T_R = T_{68}/T_{\text{кр}}$ ;  $p_{\text{кр}}$  — критическое давление, равное  $3742 \cdot 10^3$  Па;  $T_{\text{кр}}$  — критическая температура, равная 227,5 К;  $A_1 = -6,7651056$ ;  $A_2 = 1,0777437$ ;  $A_3 = -1,7490971$ ;  $A_4 = -2,5845119$ .

## 8.7. ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ

Измерение температуры тел пирометрами основано на использовании законов излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Поскольку характер излучения реальных тел отличается от характера излучения АЧТ, то измеренная температура тела будет отличаться от действительной. Различают яркостную (спектральную), цветовую (спектрального отношения) и радиационную температуры.

Вопросы оптической пирометрии рассмотрены в [66—69].

**Яркостная (спектральная) пирометрия** основана на измерении интенсивности (яркости) излучения тел при фиксированной длине волны. Если для длины волны  $\lambda$  интенсивность излучения тела и интенсивность излучения АЧТ равны, то температура АЧТ будет равна яркостной температуре  $T_\lambda$  излучающего тела. С термодинамической температурой  $T_\lambda$  связана соотношением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_\lambda} + \frac{\lambda}{c_2} \ln(\epsilon(\lambda, T)), \quad (8.10)$$

где  $c_2$  — вторая постоянная закона Планка, равная  $0,014388 \text{ м} \cdot \text{К}$ ;  $\epsilon(\lambda, T)$  — спектральный коэффициент теплового излучения тела на длине волны  $\lambda$ , м, при температуре  $T$ , К.

Формула (8.10) выведена в приближении закона Вина. При точных измерениях необходимо учитывать, что (8.10) дает заниженные значения  $T$  при температуре выше  $3000 \text{ К}$ .

**Цветовая пирометрия** (пирометрия спектрального отношения) основана на сравнении отношений интенсивности излучения для двух длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  для нечерного тела и АЧТ. Если эти отношения равны, то цветовая температура  $T_c$  равна температуре АЧТ. С термодинамической температурой  $T_c$  связана соотношением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_c} + \frac{1}{c_2} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)^{-1} \ln \frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)}. \quad (8.11)$$

Цветовая температура так называемых серых тел, характеризующихся условием  $\epsilon(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_2, T)$ , совпадает с термодинамической. Метод спектрального отношения нечувствителен к серой среде (пропускательная способность которой удовлетворяет условию  $\tau(\lambda_1) = \tau(\lambda_2)$ ), часто присутствующей между объектом и пирометром (например, пыль, дым, смотровые окна и т. д.).

**Радиационная пирометрия** основана на измерении полной (во всем спектральном интервале) энергии излучения тел. Если энергия полного излучения нечерного тела и энергия АЧТ равны, то температура АЧТ определяет радиационную температуру  $T_p$  нечерного тела. Радиационная температура связана с термодинамической соотношением

$$T = T_p [\epsilon_t(T)]^{-1/4}, \quad (8.12)$$

где  $\epsilon_t(T)$  — интегральный коэффициент теплового излучения тела. Применение радиационных пирометров наиболее эффективно при низкой температуре, когда спектральная излучательная способность тел мала.

Излучательная (и отражательная) способность металлов и сплавов сильно зависит от состояния поверхности (шероховатости, наличия оксидных пленок и т. д.). В табл. 8.35—8.37 приведены данные, относящиеся к чистой полированной поверхности. В табл. 8.38 даны значения интегрального коэффициента теплового излучения некоторых оксидов.

Оптические методы и средства измерения температур описаны в [24, 25, 70—75].

Таблица 8. 35. Значения спектрального коэффициента теплового излучения  $\epsilon_\lambda$  веществ для  $\lambda = 0,65$  мкм [76—78]

| Вещество, (плотность, $\rho/\rho_{\text{теор}}$ ) | T, К           | $\epsilon_\lambda$ *1 |
|---------------------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Ванадий                                           | 1000—2000      | 0,419—0,370           |
| Вольфрам                                          | 1200—2600      | 0,453—0,418           |
| Гафний                                            | 1500—1800      | 0,445—0,453           |
| Германий                                          | 1000—2000      | 0,50—0,53             |
| Графит искусственный                              | 1200—3200      | 0,90—0,83             |
| Двуоксид тория оплавленный (0,96) [85]            | 1500—3440      | 0,863—0,876*2         |
| Двуоксид урана оплавленный (0,96) [85]            | 300—3120       | 0,824—0,836*2         |
| Двуоксид циркония                                 | 1155—1800      | 0,40—0,55*3           |
| Железо                                            | 1130—1430      | 0,38—0,35*3           |
| Иридий                                            | 1300—2500      | 0,272—0,215           |
| Карбид гафния                                     | 1300—2900      | 0,73—0,60             |
| Карбид ниобия                                     | 1300—3400      | 0,66—0,49             |
| Карбид тантала оплавленный (0,95) [85]            | 300—3000       | 0,514*2               |
| Карбид урана оплавленный (0,965) [85]             | 300—1400—2780  | 0,615—0,556—0,539*2   |
| Кобальт                                           | 1180—1530      | 0,39—0,37*3           |
| Кремний                                           | 1000—1700      | 0,64—0,46             |
| Молибден                                          | 1100—2800      | 0,409—0,352           |
| Никель                                            | 1080—1500      | 0,36—0,32             |
| Никель окисленный                                 | 1100—1500      | 0,86—0,82             |
| Ниобий                                            | 1000—2600      | 0,368—0,348           |
| Оксид магния                                      | 1000—1800      | 0,15—0,43             |
| Осмий                                             | 1200—1800—2500 | 0,55—0,38—0,39        |
| Палладий                                          | 1000—1700      | 0,400—0,306           |
| Платина                                           | 1100—2000      | 0,292—0,300           |
| Платина холоднокатаная                            | 1100—1500      | 0,32—0,42             |
| Рений                                             | 1000—2900      | 0,432—0,370           |
| Родий                                             | 1100—2100      | 0,269—0,196           |
| Тантал                                            | 1200—2400      | 0,445—0,414           |
| Таитал старый                                     | 1100—1600—2800 | 0,49—0,44—0,41        |
| Титан                                             | 1000—1900      | 0,503—0,444           |
| Хром                                              | 1733           | 0,39                  |
| Цирконий                                          | 1000—2100      | 0,450—0,403           |

\*1 Спектральная излучательная способность соответствует указанным температурам. Линейная интерполяция между точками достаточно точная.

\*2  $\lambda = 0,665$  мкм.

\*3  $\lambda = 0,63$  мкм.

Таблица 8. 36. Значения спектрального коэффициента теплового излучения  $\epsilon_\lambda$  веществ при разных длинах волны [76]

| Вещество           | T, К     | Тип*1 | Длина волны, мкм |       |        |         |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|----------|-------|------------------|-------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    |          |       | 0,3              | 0,4   | 0,5    | 0,6     | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   |
| Алюминий           | 293      | п     | 0,081            | 0,083 | 0,089  | 0,098   | 0,111 | 0,140 | 0,111 | 0,068 | 0,030 | 0,026 | 0,024 | 0,023 |
|                    | 293 [78] | h     | —                | —     | —      | —       | —     | —     | —     | —     | 0,070 | 0,059 | 0,051 | 0,046 |
|                    | 1200     | п     | 0,486            | 0,482 | 0,474  | 0,461   | 0,446 | 0,428 | 0,408 | 0,386 | 0,186 | 0,112 | 0,086 | 0,078 |
| Вольфрам*2         | 2600     | п     | 0,465            | 0,461 | 0,447  | 0,426   | 0,411 | 0,394 | 0,376 | 0,360 | 0,248 | 0,191 | 0,163 | 0,146 |
|                    | 293 [78] | h     | —                | 0,97  | 0,960  | 0,950   | 0,925 | 0,90  | 0,89  | 0,87  | 0,72  | 0,600 | 0,500 | —     |
|                    | 293 [78] | h     | —                | —     | 0,440  | 0,430   | 0,420 | 0,39  | 0,37  | 0,36  | 0,22  | 0,160 | 0,110 | 0,080 |
| Графит*3           | 293      | п     | 0,64             | 0,63  | 0,540  | 0,130   | 0,040 | 0,03  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,017 | 0,014 | 0,012 |
| Железо             | 293      | п     | 0,67             | 0,50  | 0,400  | 0,200   | 0,030 | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,018 | 0,016 | 0,014 | 0,012 |
| Золото             | 293      | п     | —                | 0,480 | 0,475  | 0,463   | 0,461 | 0,459 | 0,420 | 0,405 | 0,125 | 0,082 | 0,073 | 0,060 |
| Медь               | 293 [78] | п     | —                | 0,458 | 0,438  | 0,417   | 0,394 | 0,367 | 0,333 | 0,302 | 0,106 | 0,063 | 0,046 | 0,035 |
|                    | 1000     | п     | —                | 0,440 | 0,422  | 0,403   | 0,383 | 0,361 | 0,333 | 0,310 | 0,151 | 0,096 | 0,073 | 0,059 |
|                    | 1400     | п     | —                | 0,419 | 0,403  | 0,387   | 0,370 | 0,352 | 0,333 | 0,317 | 0,191 | 0,133 | 0,102 | 0,084 |
| Молибден*2         | 2000     | п     | —                | 0,60  | 0,48   | 0,42    | 0,36  | 0,33  | 0,31  | 0,29  | 0,27  | 0,17  | 0,14  | 0,11  |
| Палладий           | 295      | п     | 0,60             | 0,48  | 0,42   | 0,36    | 0,33  | 0,31  | 0,29  | 0,27  | 0,17  | 0,14  | 0,11  | 0,08  |
|                    | 293 [78] | h     | —                | —     | 0,08   | 0,06    | 0,05  | 0,045 | 0,04  | 0,03  | 0,025 | 0,02  | 0,02  | 0,02  |
|                    | 293      | п     | 0,50             | 0,45  | 0,42   | 0,39    | 0,38  | 0,37  | 0,36  | 0,35  | 0,22  | 0,16  | 0,12  | 0,10  |
| Серебро            | 293      | п     | —                | —     | 0,56*4 | 0,493*5 | —     | —     | —     | 0,210 | 0,110 | 0,080 | 0,070 | 0,065 |
| Сталь углеродистая | 1200     | п     | —                | 0,525 | 0,51   | 0,473   | 0,421 | 0,363 | 0,304 | 0,262 | 0,148 | 0,123 | 0,108 | —     |
|                    | 2400     | п     | —                | 0,498 | 0,46   | 0,432   | 0,399 | 0,366 | 0,338 | 0,317 | 0,220 | 0,190 | 0,168 | —     |
|                    | 293 [78] | п     | —                | —     | 0,56*4 | 0,493*5 | —     | —     | —     | 0,210 | 0,110 | 0,080 | 0,070 | 0,065 |
| Тантал*2           | 1200     | п     | —                | 0,525 | 0,51   | 0,473   | 0,421 | 0,363 | 0,304 | 0,262 | 0,148 | 0,123 | 0,108 | —     |
|                    | 2400     | п     | —                | 0,498 | 0,46   | 0,432   | 0,399 | 0,366 | 0,338 | 0,317 | 0,220 | 0,190 | 0,168 | —     |

\*1 p — значения спектрального коэффициента теплового излучения в направлении нормали; h — то же в пределах полусферы.

\*2 В высокотемпературной области при фиксированной длине волны линейная интерполяция между указанными температурами достаточно точная.

\*3 Графит пористый искусственный.

\*4  $\lambda = 0,467$  мкм.

\*5  $\lambda = 0,665$  мкм.

Таблица 8.37. Значения интегрального коэффициента теплового излучения  $\epsilon_\ell$  некоторых веществ [76—78]

| Вещество                                    | T, К                | Тип* | $\epsilon_\ell$ **      |
|---------------------------------------------|---------------------|------|-------------------------|
| Алюминий:                                   | 50—800              | h    | 0,008—0,062             |
| сильно окисленный                           | 360—800             | h    | 0,20—0,33               |
| электролитически                            | 310                 | h    | 0,72—0,83               |
| окисленный, 4—10 мкм                        | 1100—1300—1480      | n    | 0,41—0,57—0,87          |
| Бериллий                                    |                     |      |                         |
| Бронза:                                     | 450—1270            | n    | 0,03—0,06               |
| алюминиевая                                 | 450—1270            | n    | 0,08—0,16               |
| окисленная                                  | 1000—1300—2000      | h    | 0,145—0,190—0,257       |
| Знарядий                                    | 273—373             | n    | 0,92—0,96               |
| Зода:                                       | 273                 | n    | 0,96                    |
| лед гладкий                                 | 273                 | n    | 0,985                   |
| лед, покрытый инеем                         | 273                 | n    | 0,039—0,081—0,249—0,345 |
| Вольфрам                                    | 400—800—2000—3400   | h    | 0,116—0,201—0,247—0,312 |
| »                                           | 1200—1800—2200—3000 | n    |                         |
| Гафний                                      | 1200—2000           | h    | 0,284—0,324             |
| Графит                                      | 1200—3200           | h    | 0,77—0,83               |
| Дюраль Д 16                                 | 500—900             | n    | 0,016—0,03              |
| Железо                                      | 160—1100            | h    | 0,081—0,254             |
| »                                           | 600—1100            | n    | 0,20—0,56               |
| Золото                                      | 50—1150             | h    | 0,014—0,063             |
| Иридий                                      | 1300—2500           | h    | 0,12—0,21               |
| »                                           | 295                 | n    | 0,04                    |
| Кадмий                                      | 80—300              | h    | 0,03                    |
| Кобальт                                     | 1100—1500           | h    | 0,21                    |
| Латунь:                                     | 373                 | n    | 0,06                    |
| отлично полированная                        | 500—610             | h    | 0,02                    |
| окисленная                                  | 450—590             | n    | 0,56—0,64               |
| Магний                                      | 410—490             | h    | 0,12                    |
| Манганин прокатанный                        | 391                 | n    | 0,048                   |
| Медь                                        | 50—300—800—1100     | h    | 0,022—0,024—0,05—0,061  |
| »                                           | 80—380—1160         | n    | 0,02—0,01—0,02          |
| » окисленная                                | 300—600—800—1100    | h    | 0,38—0,47—0,59—0,87     |
| » окисленная                                | 80—540—700—1078     | n    | 0,66—0,78—0,90—0,93     |
| Молибден                                    | 1100—2100—2400—2800 | h    | 0,105—0,225—0,254—0,282 |
| »                                           | 293                 | n    | 0,009                   |
| »                                           | 1100—2800           | n    | 0,096—0,275             |
| Никель                                      | 300—1500            | h    | 0,068—0,196             |
| »                                           | 500—1400            | n    | 0,061—0,182             |
| » окисленный                                | 420—700—980         | n    | 0,07—0,39—0,47          |
| Нюбий                                       | 1000—1700—2400      | h    | 0,116—0,187—0,244       |
| »                                           | 1000—1800—2600      | n    | 0,085—0,170—0,232       |
| Нихром:                                     |                     |      |                         |
| прокатанный                                 | 800—950—1100        | n    | 0,20—0,24—0,36          |
| окисленный                                  | 480—900—1200        | h    | 0,62—0,67—0,78          |
| Оксид железа Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 310—1350            | h    | 0,82—0,89               |
| Олово                                       | 310—360             | h    | 0,05                    |
| Палладий                                    | 1000—1300—1600      | h    | 0,10—0,15—0,18          |
| »                                           | 400—1520            | n    | 0,02—0,17               |
| Платина                                     | 300—1000—1400—1900  | h    | 0,041—0,128—0,167—0,200 |
| »                                           | 400—800—1600—2000   | n    | 0,029—0,080—0,162—0,184 |
| Рений                                       | 1000—1400—1900—     | h    | 0,164—0,201—0,255—      |
| »                                           | 2300—2600—2900      | h    | 0,290—0,309—0,322       |
| Родий                                       | 900—1200—1600—      | h    | 0,068—0,112—0,150—      |
| »                                           | 1900—2200           | h    | 0,169—0,183             |
| »                                           | 900—1600            | n    | 0,053—0,100             |
| Ртуть чистая                                | 273—373             | n    | 0,09—0,12               |
| Свинец:                                     | 310—530             | h    | 0,04—0,08               |
| серый окисленный                            | 270—470             | h    | 0,28                    |
| окисленный при 473 К                        | 473                 | h    | 0,63                    |
| Серебро                                     | 100—1100            | h    | 0,012—0,046             |
| »                                           | 80—300              | n    | 0,020—0,075             |



| Вещество                | T, К                | Тип*1 | $\epsilon_t^{**}$       |
|-------------------------|---------------------|-------|-------------------------|
| Сталь:                  |                     |       |                         |
| углеродистая            | 100—1400            | h     | 0,06—0,31               |
| » окисленная            | 573—1073            | h     | 0,86—0,91               |
| 07X16H6                 | 250—900             | п     | 0,13—0,28               |
| » окисленная при 1173 К | 300—1000            | п     | 0,84                    |
| 12X18H10T               | 180—700—1200        | п     | 0,13—0,24—0,38          |
| 08X18H12B               | 100—1000—1390       | п     | 0,17—0,25—0,65          |
| Стекло                  | 293                 | п     | 0,94                    |
| Сурьма                  | 300—350             | п     | 0,28—0,31               |
| Тантал                  | 1000—2300—2700—3300 | h     | 0,132—0,251—0,282—0,316 |
| »                       | 80—300              | п     | 0,020—0,075             |
| »                       | 1300—1600—2000      | п     | 0,132—0,170—0,260       |
| » нитрид                | 800—1500—2600       | п     | 0,74—0,80—0,60          |
| Теллур                  | 295                 | п     | 0,22                    |
| Титан:                  | 900—1400—1900       | h     | 0,217—0,274—0,323       |
| электрополированный     | 250—370             | h     | 0,10—0,13               |
| карбид                  | 1200—3000           | h     | 0,60—0,75               |
| Уран                    | 1200                | h     | 0,35                    |
| » карбид                | 1600—2000           | h     | 0,42                    |
| Хром                    | 270—600—750—1220    | п     | 0,06—0,06—0,10—0,42     |
| »                       | 80                  | h     | 0,07                    |
| Цинк                    | 300—530             | п     | 0,02—0,06               |
| » окисленный            | 300—470—800         | п     | 0,28—0,14—0,11          |
| Цирконий                | 1100—1600—2100      | h     | 0,204—0,248—0,278       |
| Карбид                  | 1400—2900           | h     | 0,40—0,55               |
| Диборид                 | 1200—2500           | h     | 0,53—0,75               |

\*1  $\epsilon$  — значения интегрального коэффициента теплового излучения в направлении нормали;  $h$  — то же в пределах полусферы.

\*\* Значения интегрального коэффициента теплового излучения соответствуют указанным температурам. Линейная интерполяция между точками достаточно точная.

Таблица 8.38. Значения интегрального коэффициента теплового излучения некоторых оксидов [76]

| Вещество                       | Температура, К |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                | 20             | 400  | 600  | 800  | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 |
| MgO                            | 0,73           | 0,69 | 0,57 | 0,52 | 0,42 | 0,35 | 0,30 | 0,28 | 0,29 | 0,35 | 0,49 | —    | —    |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,81           | 0,75 | 0,65 | 0,53 | 0,42 | 0,37 | 0,37 | 0,39 | 0,46 | 0,55 | 0,62 | 0,66 | 0,69 |
| ThO <sub>2</sub>               | —              | —    | 0,61 | 0,52 | 0,43 | 0,38 | 0,37 | 0,40 | 0,49 | 0,61 | 0,68 | 0,71 | —    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | —              | 0,79 | 0,71 | 0,60 | 0,52 | 0,46 | 0,42 | 0,40 | 0,39 | —    | —    | —    | —    |

## 8.8. ТЕРМОИНДИКАТОРЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Термоиндикаторы (ТИН) — вещества (смеси веществ), изменяющие свой внешний вид (цвет, яркость свечения, форму) при определенной температуре — критической температуре ТИН  $t_{кр}$  и используемые для регистрации этой температуры.

ТИН подразделяют на две группы: обратимые — ТИН, исходный внешний вид (цвет или яркость свечения) которых восстанавливается после восстановления исходной температуры; необратимые — ТИН, необратимо изменяющие свой внешний вид (цвет или форму) при воздействии критической температуры. Различают пять типов ТИН: термохимический индикатор, кристаллоструктурный, люминесцентный, жидкокристаллический ТИН и ТИН плавления. ТИН применяют в виде термopорошков,

термокрасок, термолаков, термopаст, термокарандашей и термотаблеток. Измерение температур термоиндикаторами описано в [79—81].

Измерители максимальной температуры кристаллические (ИМТК) — датчики максимальной температуры, рабочее вещество которых (обычно облученные нейтронами алмаз или карбид кремния) изменяет параметр кристаллической решетки в зависимости от температуры и времени выдержки. Максимальную температуру определяют с помощью градуировочного графика по изменению параметра решетки с учетом времени выдержки (длительность отжига) [82]. ИМТК используют для измерения температур в диапазоне 150—1200 °С с временами выдержки от 10<sup>2</sup> до 10<sup>6</sup> с. Погрешность измерений составляет ±6 °С на стационарных режимах и ±12 °С на нестационарных. ИМТК имеют малые размеры: стандартный — диаметр 1 и длина 5 мм; микроизмеритель — 0,3×0,3×0,3 мм.

Не обладая большой точностью, методы термоиндикаторов и измерителей максимальной температуры иногда полезны, а в ряде случаев и труднозаменяемы (при

исследовании тепловых полей, в аэродинамических измерениях, при измерении температур токонесущих элементов, деталей машин и механизмов и т. п.).

Т а б л и ц а 8.39. Классификация термоиндикаторов [81]

| Тип                       | Вид                                                              | Группа по обратимости                  | Температурный диапазон, °С | Относительная погрешность, % | Количество цветовых переходов | Зависимость от условий нагрева |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Термохимические           | Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска | Обратимые, необратимые, квазиобратимые | 50÷1000                    | 2,5—10                       | Один или несколько            | Зависимые                      |
| Термоиндикаторы плавления | Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска | Необратимые, обратимые                 | 35÷1150                    | 0,5—2,5                      | Один                          | Независимые                    |
| Жидкокристаллические      | Порошок, краска                                                  | Обратимые                              | —20÷+250                   | 0,1—2                        | Неограниченное количество     | Зависимые                      |
| Люминесцентные            | Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска | »                                      | —200÷+100                  | 0,5—2                        | Один или несколько            | То же                          |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Comptes Rendus des Seances de la Treizieme Conference Generale des Poids et Mesures (1967—1968); Resolutions 3 and 4*, P. 104.

2. Кричевский И. Р. Понятия и основы термодинамики. — 2-е изд. М.: Химия, 1970.

3. Wolfe H. G. The Temperature concept; Temperature, its measurements and control in science and industry. Ed by Hugh C. Wolfe. N. Y.; Reinhold, 1955. Vol. 2. Ch. 1. P. 3—8.

4. de Boer J.//Metrologia. 1965. Vol. 1. P. 158—169.

5. Quinn T. J., Compton J. P.//Rep. Prog. Phys. 1975. Vol. 38. P. 151—239.

6. Попов М. М. Термометрия и калориметрия. — 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1954.

7. Гордов А. Н. Температурные шкалы. М.: Изд-во стандартов, 1966.

8. Hudson R. P.//Rev. Sci. Instrum. 1980. Vol. 51. P. 871—881.

9. Hall J. A.//J. Sci. Instrum. 1966. Vol. 43. P. 511—547.

10. Куинн Т. Температура: Пер. с англ./Под ред. Д. Н. Астрова. М.: Мир, 1985.

11. Орлова М. П. Низкотемпературная термометрия. М.: Изд-во стандартов, 1975.

12. Temperature, its measurement and control in science and industry. Vol. 1. N. Y.: Reinhold, 1941; Vol. 2. N. Y.: Reinhold, 1955; Vol. 3. N. Y.: Reinhold, 1962; Vol. 4. Pittsburgh: Instrument Society of America, 1972; Vol. 5. N. Y.: American Institute of Physics, 1982.

13. The International Practical Temperature Scale of 1968//Metrologia. 1969. Vol. 5. P. 35—44.

14. Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ—68). М.: Изд-во стандартов, 1971.

15. Preston-Thomas H.//Metrologia. 1976. 12. P. 7—17.

16. Crovini L., Bedford R. E., Moser A.//Metrologia. 1977. Vol. 13. P. 197—206.

17. Bedford R. E., Crovini L., Maas H., Skakala J.//Comité Consultatif de Thermometrie, 13<sup>e</sup> Session, Annexe T3. 1980. P. T55—T79.

18. Bedford R. E., Bonnier G., Maas H., Pavese F.//

Comité Consultatif de Thermometrie, 14<sup>e</sup> Session, Appendix T3, 1982. P. T124—T132.

19. The 1976 Provisional 0, 5 K to 30 K temperature Scale//Metrologia. 1979. Vol. 15. P. 65—68.

20. Brickwedde F. G., Van Dijk H., Durieux M., Clement J. R., Logan J. K.//J. Res. NBS. 1960. Vol. 64A. P. 1—18.

21. Sherman R. H., Sydoriak S. G., Roberts T. R.//J. Res. NBS. 1964. Vol. 68A. P. 547—588.

22. Кыгин Г. А., Астров Д. Н.//Измерительная техника. 1983. № 4. С. 62—63.

23. Comité Consultatif de Thermometrie. 14 Session, 1982. Recommendation T1. P. T85—T86.

24. Геращенко О. А., Гордов А. Н., Лах В. И. и др. Температурные измерения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1984.

25. Сосновский А. Г., Столярова Н. И. Измерение температур. М.: Изд-во стандартов, 1970.

26. Линевер Ф. Измерение температур в технике: Справочник/Пер. с нем./Под ред. Л. А. Чарихова. М.: Металлургия, 1980.

27. Геращенко О. А., Федоров В. Г. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. Киев: Наукова думка, 1965.

28. Wise J. A. Liquid-in-glass thermometry//NBS Monograph. 1976. Vol. 150.

29. Thompson R. D.//ISA Trans. 1968. Vol. 7. P. 87—92.

30. Ween S.//ISA Trans. 1968. Vol. 7. P. 93—100.

31. Стрелков П. Г., Боровик-Романов А. С., Орлова М. П.//Журн. физ. хим. 1954. Т. 28. № 2. С. 345—352.

32. Бродский А. Д. Новые методы измерения низких температур. М.—Л.: Изд-во стандартов, 1962.

33. Датчики для измерения температуры в промышленности/Г. В. Самсонов, А. И. Киц, О. А. Кюздени и др. Киев: Наукова думка, 1972.

34. Бочковский Р. В. Контактные датчики температуры. М.: Металлургия, 1978.

35. Вештек Я. Измерение низких температур электрическими методами: Пер. с чеш./Под ред. М. П. Орловой. М.: Энергия, 1980.

36. Riddle J. L., Furukawa G. T., Plumb H. H.//Platinum Resistance Thermometry. 1973. Vol. 126.

37. Johnston J. S.//Temperature Measurement 1975. Conference Series N 26. Lond.: Institute of Physics. 1975. P. 80—90.
38. Anderson R. L., Kollie T. G.//Critical Rev. in Analyt. Chem. 1975. Vol. 6. P. 171—221.
39. Dauphinee T. M., Preston-Thomas H.//Rev. Sci. Instrum. 1954. Vol. 25. P. 884—886.
40. Орлова М. П., Астров Д. Н., Медведева Л. А.//Приборы и техника эксперимента. 1964. № 1. С. 230—232.
41. Кытин Г. А., Астров Д. Н., Зорин Р. В. Усовершенствование конструкции и исследование воспроизводимости показаний германиевых термометров сопротивления//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 83—92.
42. Зарубин Л. И., Немши И. Ю. Характеристики термометров сопротивления для криогенных температур//Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Киев: Наукова думка. 1974. Вып. 17. С. 77—79.
43. Rubin L. G., Brandt B. L., Sample H. H.//Cryogenics. 1982. Vol. 22. P. 491—503.
44. Варфоломеев С. Ф., Пекальн Л. А., Алышин Б. И. и др.//Приборы и техника эксперимента. 1977, № 1. С. 262—264.
45. Логвиненко С. П., Бевза Ю. Г.//Измерительная техника. 1967. № 1. С. 42—44.
46. Логвиненко С. П., Алуф Г. Д., Зароченцева Т. М. Использование диодов для измерения низких температур//Тр. ФТИИТ. 1972. Вып. 2. С. 72—74.
47. White G. K. Experimental Techniques in Low-Temperature Physics. 3-d ed. Oxford: Clarendon Press. 1979. Ch. IV
48. Астров Д. Н., Белянский Л. Б. Измерение низких температур (обзор)//Физика низких температур. 1967. Т. 2. № 7. С. 821—848.
49. Burns G. W., Hurst W. S.//Temperature Measurement. 1975. Conference Series N 26, Lond.: Institute of Physics. 1975. P. 144—161.
50. Данишевский С. К., Сведе-Швец Н. И. Высокотемпературные термометры. М.: Металлургия, 1977.
51. Самсонов Г. В., Кислый П. С. Высокотемпературные неметаллические термометры и наконечники. Киев: Наукова думка, 1965.
52. Guildner L. A., Burns G. W.//High Temp.-High Press. 1979. Vol. 11. P. 173—192.
53. Bedford R. E.//High Temp.-High Press. 1972. Vol. 4. P. 241—260.
54. Kinzie P. A.//Thermocouple Temperature Measurement. N. Y.: John Wiley. 1973.
55. Медведева Л. А., Орлова М. П., Алексахин И. А., Духовлинова Н. Д. Измерение низких температур термометрами на основе сплава золота с кобальтом//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 154—180.
56. Медведева Л. А., Орлова М. П., Рабинькин А. Г. Измерение низких температур термометрами на основе сплава золота с железом//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 181—192.
57. Бейлин В. М., Лапп Г. Б., Павлов Б. П. и др.//Измерительная техника. 1975. № 6. С. 35—36.
58. ГОСТ 3044—77. Преобразователи термоэлектрические. Градуировочные таблицы
59. Методы измерения температур: Сб. статей/Под ред. В. А. Соколова. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
60. Рорельберг И. Л., Бейлин В. М. Сплавы для термометра: Справочник. М.: Металлургия, 1983.
61. Hudson R. P.//Experimental Cryophysics. Lond.: Butterworths. 1961. Ch. 9.
62. Cataland G., Edlow M. H., Plumb H. H. Recent experiments on liquid helium vapor pressure measurements from 2 to 4 K: Temperature, its measurement and control in science and industry. N. Y.: Reinhold. 1962. Vol. 3(1). P. 413.
63. Sydoriak S. G., Rogerst T. R., Sherman R. H.//J. Res. NBS. 1964. Vol. 68A. P. 547—559.
64. Lobo L. Q., Staveley L. A. K.//Cryogenics. 1979. Vol. 19. P. 335—338.
65. Frels W., Smith D. R., Ashworth T.//Cryogenics. 1974. Vol. 14. P. 3—7.
66. Рибо Г. Оптическая пирометрия. М.—Л.: Гостехтеориздат, 1934.
67. Гаррисон Т. Р. Радиационная пирометрия. М.: Мир, 1964
68. Гордов А. Н. Основы пирометрии. — 2-е изд. М.: Металлургия, 1971.
69. Киренков И. И. Метрологические основы оптической пирометрии. М.: Изд-во стандартов, 1976.
70. Оптические методы измерения температур в металлургии. Теория, системы, элементы: Сб. статей/Под ред. Д. Я. Света. М.: Наука, 1979
71. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982.
72. Поскачей А. А., Чубаров Е. П. Оптикоэлектронные системы измерения температуры. М.: Энергия, 1979.
73. Поскачей А. А., Чарихов Л. А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. М.: Металлургия, 1978.
74. Чернин С. М., Коган А. В. Измерение температур малых тел пирометрами излучения. М.: Энергия, 1980.
75. Методы и средства оптической пирометрии. М.: Наука, 1983.
76. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник/Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.
77. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.
78. Kaspar J. Radiometry//American Institute of Physics Handbook. 3-d ed. N. Y.: McGraw-Hill Company. 1972.
79. Абрамович Б. Г. Термоиндикаторы и их применение. М.: Энергия, 1972.
80. Абрамович Б. Г., Картавцев В. Ф. Цветовые индикаторы температуры. М.: Энергия, 1978.
81. Абрамович Б. Г., Матвеев В. В. Метод измерения температуры термоиндикаторами//Методы и средства оптической пирометрии. М.: Наука, 1983.
82. Николаенко В. А., Карпунин В. И. Измерение температуры с помощью облученных материалов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
83. Supplementary information for the IPTS-68 and EPT-76//Monographie Bureau International des Poids et Mesures. 1st ed. July 1983.
84. Rusby R. L., Durieux M.//Cryogenics. 1984. Vol. 4. P. 363—366.
85. Boder M., Karow H. U., Müller K.//High Temp.—High Press. 1980. Vol. 12. P. 161—168.

# ГЛАВА 9 ТЕПЛОЕМКОСТЬ

М. Н. Хлопкин

## 9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### Определение и единицы теплоемкости

Теплоемкость тела  $C$  есть отношение количества теплоты  $\Delta Q$ , подведенной к телу в данных условиях, к соответствующему повышению температуры  $\Delta T$ . В соответствии с третьим началом термодинамики теплоемкость любого тела стремится к нулю при приближении к абсолютному нулю температуры.

Удельная  $c$ , Дж/(кг·К), и молярная  $C$ , Дж/(моль·К), теплоемкости вещества определяются как теплоемкости соответственно единицы массы и одного моля данного вещества. Они связаны соотношением  $C = Mc$ , где  $M$  — масса одного моля, кг.

Теплоемкость тела зависит от условий нагревания. Наиболее употребительны: теплоемкость при постоянном давлении (изобарная теплоемкость)  $c_p$ , теплоемкость при постоянном объеме (изохорная теплоемкость)  $c_v$  и теплоемкость под давлением насыщенных паров (вдоль линии сосуществования фаз)  $c_s$ . Величины  $c_p$  и  $c_v$ , Дж/(моль·К), связаны соотношением

$$c_p - c_v = \alpha^2 TV / k_T,$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>;  $T$  — температура, К;  $V$  — молярный объем, м<sup>3</sup>/моль;  $k_T$  — изотермическая сжимаемость, Н/м<sup>2</sup> (Па).

### Теплоемкость твердых тел

Разность  $c_p - c_v$  для твердых тел обычно невелика. Теплоемкость твердых тел за исключением твердого гелия, слабо зависит от давления.

Важнейшим параметром, характеризующим температурную зависимость теплоемкости твердого тела, является характеристическая температура Дебая (дебаевский параметр)  $\theta$ , К, определяемая соотношением  $k\theta = h\nu$ , где  $k$  — постоянная Больцмана, Дж/К;  $h$  — постоянная Планка, Дж·с;  $\nu$  — максимальная частота колебаний атома в кристалле, Гц.

В соответствии с квантовой теорией Дебая молярная колебательная теплоемкость твердого тела  $c_v$ , Дж/(моль·К), определяется соотношением

$$c_v = 3RnD(\theta/T),$$

где  $R$  — газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $n$  — число атомов в молекуле;  $D$  — функция Дебая (табулирована в табл. 9.7);  $\theta$  — дебаевский параметр, К;  $T$  — температура, К.

При температуре, большей дебаевской ( $T > \theta$ ), выполняется закон Дюлонга — Пти

$$c_v = 3Rn \approx 25n \text{ Дж/(моль·К)}.$$

При низкой по сравнению с дебаевским параметром температуре ( $T < 0,1 \theta$ ) молярную теплоемкость твердого тела  $c_v$ , Дж/(моль·К), обычно представляют так:

$$c_v = 1944 n (T/\theta)^3 + \gamma T,$$

где  $n$ ,  $T$  и  $\theta$  — те же величины, что и в предыдущих соотношениях;  $\gamma$  — коэффициент электронной теплоемкости, Дж/(моль·К<sup>2</sup>). Для диэлектриков и полупроводников  $\gamma = 0$ . Большие отклонения температурного хода теплоемкости от приведенного выше соотношения наблюдаются в лантаноидах, актиноидах, их химических соединениях, а

также при наличии в веществе магнитных ионов, когда существенный вклад в теплоемкость дают тепловые возбуждения электронов внутренних оболочек атомов и магнитных моментов ионов. Происходящие в твердом теле процессы упорядочения (структурного, магнитного, сверхпроводящего и др.) также ведут к существенным аномалиям теплоемкости.

### Теплоемкость разреженных газов

Разность изобарной и изохорной молярных теплоемкостей  $c_p - c_v$ , Дж/(моль·К), разреженных газов описывается соотношением  $c_p - c_v = R$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Согласно закону распределения каждая поступательная и вращательная степень свободы молекулы дает в молярную изохорную теплоемкость вклад, равный  $R/2$ , а каждая возбужденная колебательная — вклад, равный  $R$ . Колебательные степени свободы возбуждаются и дают вклад в теплоемкость лишь при высокой температуре ( $T > h\nu/k$ , где  $\nu$  — частота колебаний атомов в молекуле). При учете поступательных и вращательных степеней свободы и пренебрежении колебательными закон равнораспределения дает для молярных изохорной  $c_v$  и изобарной  $c_p$  теплоемкостей, Дж/(моль·К):  $c_v = 1,5 R$ ;  $c_p = 2,5 R$  — для одноатомного газа;  $c_v = 2,5 R$ ;  $c_p = 3,5 R$  — для двухатомного газа;  $c_v = 3 R$ ;  $c_p = 4 R$  — для многоатомного газа.

Эти соотношения хорошо выполняются для одноатомных газов, хуже для двухатомных и плохо для многоатомных. Теплоемкость двух- и многоатомных газов при низкой температуре меньше, чем следует из закона равнораспределения, вследствие уменьшения вклада вращательных степеней свободы. При высокой же температуре теплоемкость этих газов больше, чем следует из закона равнораспределения, вследствие термического возбуждения колебательных степеней свободы и частичной диссоциации молекул.

### Теплоемкость плотных газов и жидкостей

Для плотных газов в отличие от разреженных разность молярных теплоемкостей  $c_p - c_v$  может существенно отличаться от универсальной газовой постоянной  $R$ . Молярная теплоемкость плотного газа, как правило, больше, чем разреженного. С приближением к критической точке теплоемкость газа возрастает и в критической точке обращается в бесконечность. Для описания теплоемкости жидкости не существует простых закономерностей.

### Теплоемкость сплавов, растворов и смесей

Теплоемкость сплавов, растворов и смесей нескольких компонентов  $c_{см}$  с небольшим отличием от идеальности приближенно удовлетворяет правилу аддитивности Коппа — Неймана

$$c_{см} = \sum_j z_j C_j,$$

где  $z_j$  — молярная (массовая) доля  $j$ -го компонента смеси;  $C_j$  — молярная (удельная) теплоемкость  $j$ -го компонента. Правило аддитивности хорошо выполняется для разреженных газов и хуже — для плотных газов. Существен-

ные отклонения от правила аддитивности наблюдаются в растворах электролитов, в ряде интерметаллических соединений, а также при наличии фазовых переходов.

## Теплоемкость вблизи фазовых переходов

Для фазовых переходов первого рода (испарение, плавление, сублимация, переход из одной кристаллической модификации в другую и т. д.) характерно скачкообразное изменение энтальпии, что приводит к соответствующей скрытой теплоте перехода  $\Delta H$ . Теплоемкость при фазовом переходе первого рода, как правило, изменяется, причем теплоемкость высокотемпературной фазы может быть как больше, так и меньше теплоемкости низкотемпературной фазы.

При фазовых переходах второго рода происходит непрерывное изменение энтальпии, выделения скрытой теплоты не происходит, а теплоемкость испытывает скачок, сопровождающийся резким максимумом. При фазовых переходах второго рода теплоемкость низкотемпературной фазы, как правило, больше теплоемкости высокотемпературной фазы.

## Справочная литература по теплоемкости

Термодинамические функции (теплоемкость, энтальпия и энтальпия) индивидуальных веществ (элементов и химических соединений) при температуре 298,15 К приведены в [1]. В [2] приведены термодинамические функции индивидуальных веществ (преимущественно в газообразном состоянии) в широкой области температур. Теплоемкости элементов и бинарных сплавов в широком интервале температур содержатся в [3, 15]. Теплоемкости элементов, неорганических и органических соединений приведены в [4]. Теплоемкости материалов при температурах ниже 300 К содержатся в [5].

### 9.2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

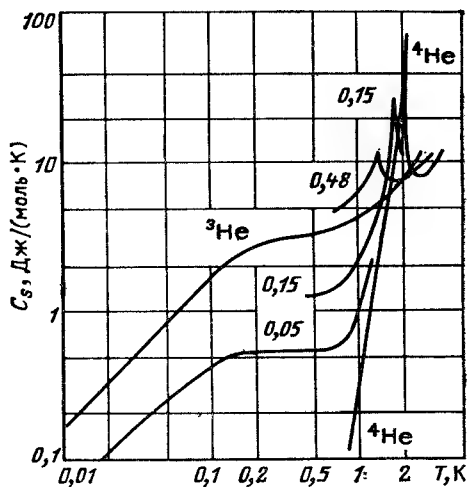


Рис. 9.1. Молярные теплоемкости  $C_s$  жидких изотопов гелия  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  и растворов  $^3\text{He}$ — $^4\text{He}$  с молярной долей  $^3\text{He}$ , равной 0,05; 0,15; 0,48 при давлении насыщающих паров [51]

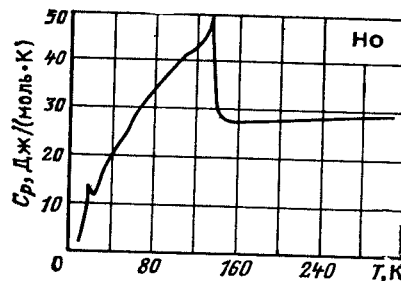


Рис. 9.2. Молярная теплоемкость гольмия [4]

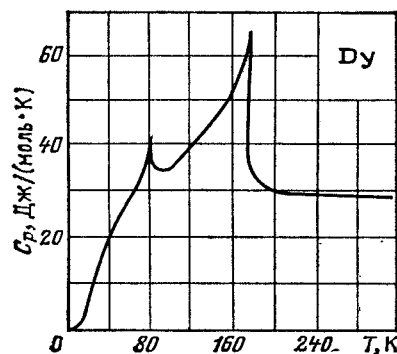


Рис. 9.3. Молярная теплоемкость диспрозия [4]

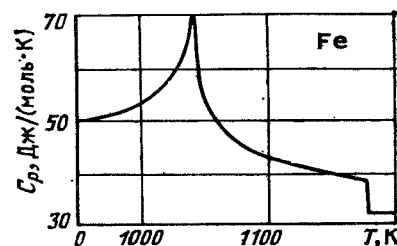


Рис. 9.4. Молярная теплоемкость железа вблизи ферромагнитного фазового перехода [52]

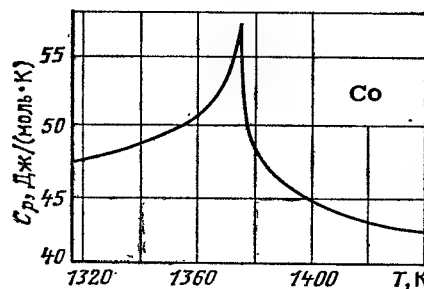


Рис. 9.5. Молярная теплоемкость кобальта вблизи ферромагнитного фазового перехода [53]

Таблица 9.1. Молярная изобарная теплоемкость  $c_p$  элементов при температуре 298,15 К и давлении 0,10135 МПа

Вещества в жидком и газообразном состояниях отмечены буквами «ж» и «г». Различные кристаллические модификации отмечены греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и др. Теплоемкость газов приведена в состоянии идеального газа, т. е. при предельно низком давлении. Химическая формула приведена лишь для немолекулярных молекул

| Вещество, формула                 | $c_p$ ,<br>Дж/(моль·К) | Литература | Вещество, формула           | $c_p$ ,<br>Дж/(моль·К) | Литература |
|-----------------------------------|------------------------|------------|-----------------------------|------------------------|------------|
| Азот N <sub>2</sub> (г)           | 29,12                  | [2]        | Нептуний                    | 29,46                  | [1]        |
| Актиний                           | 27,20                  | [1]        | Никель                      | 26,07                  | [1]        |
| Алюминий                          | 24,35                  | [2]        | Ниобий                      | 24,44                  | [2]        |
| $\alpha$ -Америций                | 25,86                  | [1]        | $\beta$ -Олово белое        | 27,11                  | [2]        |
| Аргон (г)                         | 20,79                  | [3]        | $\alpha$ -Олово серое       | 25,78                  | [1]        |
| Барий                             | 28,10                  | [2]        | Осмий                       | 24,70                  | [1]        |
| $\alpha$ -Бериллий                | 16,44                  | [2]        | Палладий                    | 25,86                  | [1]        |
| Бор (кр)                          | 11,09                  | [2]        | Платина                     | 25,86                  | [1]        |
| Бор аморфный                      | 11,95                  | [2]        | $\alpha$ -Плутоний          | 31,20                  | [1]        |
| Бром Br <sub>2</sub> (ж)          | 75,68                  | [2]        | Полоний                     | 26,40                  | [1]        |
| Бром Br <sub>2</sub> (г)          | 36,06                  | [2]        | $\alpha$ -Празеодим         | 27,45                  | [1]        |
| Ванадий                           | 24,48                  | [2]        | Радон (г)                   | 20,79                  | [2]        |
| Висмут                            | 26,02                  | [1]        | Рений                       | 25,23                  | [1]        |
| H-Водород H <sub>2</sub> (г)      | 28,83                  | [2]        | Родий                       | 24,98                  | [1]        |
| орто-Водород H <sub>2</sub> (г)   | 28,46                  | [2]        | Ртуть (ж)                   | 27,98                  | [1]        |
| пара-Водород H <sub>2</sub> (г)   | 29,95                  | [2]        | Рубидий                     | 31,05                  | [1]        |
| Вольфрам                          | 24,27                  | [2]        | Рутений                     | 24,06                  | [1]        |
| $\alpha$ -Гадолиний               | 37,07                  | [1]        | Самарий                     | 29,54                  | [1]        |
| Галлий                            | 26,07                  | [2]        | Свинец                      | 26,65                  | [2]        |
| Гафний                            | 25,69                  | [2]        | Селен гексагональный        | 25,36                  | [1]        |
| Гелий (г)                         | 20,79                  | [3]        | Селен моноклинный           | 27,20                  | [1]        |
| Германий                          | 23,22                  | [2]        | Селен аморфный              | 29,30                  | [1]        |
| $\alpha$ -Гольмий                 | 27,15                  | [1]        | Селен Se <sub>2</sub> (г)   | 35,40                  | [1]        |
| n-Деутерий D <sub>2</sub> (г)     | 29,20                  | [2]        | Сера ромбическая            | 22,69                  | [2]        |
| Диспрозий                         | 28,16                  | [1]        | Сера моноклинная            | 23,64                  | [1]        |
| Европий                           | 27,66                  | [1]        | Сера S <sub>2</sub> (г)     | 32,50                  | [2]        |
| $\alpha$ -Железо                  | 24,98                  | [1]        | Сера S <sub>8</sub> (г)     | 160,70                 | [1]        |
| $\beta$ -Железо                   | 26,74                  | [4]        | Серебро                     | 25,36                  | [1]        |
| Золото                            | 25,40                  | [1]        | Скандий                     | 25,50                  | [1]        |
| Индий                             | 26,90                  | [2]        | Стронций                    | 25,51                  | [2]        |
| Иод I <sub>2</sub>                | 54,44                  | [2]        | Сурьма                      | 25,23                  | [1]        |
| Иод I <sub>2</sub> (г)            | 36,89                  | [2]        | Сурьма Sb <sub>2</sub> (г)  | 35,40                  | [1]        |
| Ирландий                          | 25,10                  | [1]        | Таллий                      | 26,32                  | [2]        |
| Иттербий                          | 26,74                  | [1]        | Тантал                      | 25,29                  | [2]        |
| Иттрий                            | 26,52                  | [2]        | Теллур                      | 25,78                  | [1]        |
| Кадмий                            | 26,02                  | [1]        | Тербий                      | 28,91                  | [1]        |
| Калий                             | 29,60                  | [2]        | Технеций                    | 24,00                  | [1]        |
| Кальций                           | 25,94                  | [2]        | Титан                       | 25,06                  | [2]        |
| Кислород O <sub>2</sub> (г)       | 29,38                  | [2]        | n-Тритий T <sub>2</sub> (г) | 29,20                  | [1]        |
| Кислород, озон O <sub>3</sub> (г) | 39,37                  | [2]        | Торий                       | 26,23                  | [2]        |
| $\alpha$ -Кобальт                 | 24,8                   | [1]        | Тулий                       | 27,03                  | [1]        |
| Кремний                           | 19,79                  | [2]        | Углерод, алмаз              | 6,109                  | [2]        |
| Криптон (г)                       | 20,79                  | [2]        | Углерод, графит             | 8,536                  | [2]        |
| Ксеион (г)                        | 20,79                  | [2]        | $\alpha$ -Уран              | 27,67                  | [2]        |
| Лантан                            | 27,11                  | [2]        | Фосфор белый                | 23,82                  | [2]        |
| $\beta$ -Литий                    | 24,85                  | [1]        | Фосфор красный              | 21,21                  | [1]        |
| Лютеций                           | 26,50                  | [1]        | Фосфор черный               | 21,59                  | [1]        |
| Магний                            | 24,90                  | [2]        | Фосфор P <sub>2</sub> (г)   | 32,05                  | [1]        |
| $\alpha$ -Марганец                | 26,28                  | [1]        | Фосфор P <sub>4</sub> (г)   | 67,15                  | [1]        |
| $\beta$ -Марганец                 | 26,50                  | [1]        | Франций (ж)                 | 28,40                  | [1]        |
| $\gamma$ -Марганец                | 27,57                  | [1]        | Фтор F <sub>2</sub> (г)     | 31,30                  | [2]        |
| Медь                              | 24,43                  | [1]        | Хлор Cl <sub>2</sub> (г)    | 33,94                  | [2]        |
| Молибден                          | 23,93                  | [1]        | Хром                        | 23,55                  | [2]        |
| Мышьяк                            | 24,68                  | [1]        | Цезий                       | 32,17                  | [1]        |
| Мышьяк As <sub>2</sub> (г)        | 35,10                  | [1]        | $\beta$ -Церий              | 26,94                  | [1]        |
| Мышьяк As <sub>4</sub> (г)        | 77,40                  | [1]        | Цинк                        | 25,44                  | [1]        |
| $\beta$ -Натрий                   | 28,20                  | [1]        | Цирконий                    | 25,40                  | [2]        |
| Неодим                            | 27,40                  | [1]        | Эрбий                       | 25,44                  | [1]        |
| Неон (г)                          | 20,79                  | [3]        |                             |                        |            |

Таблица 9.2. Удельная изобарная теплоемкость  $c_p$ , Дж/(кг · К), элементов при температуре от 20 до 1500 К и давлении 0,1 МПа

Изменение состояния вещества обозначено до и после фазового перехода: т — твердое, ж — жидкое, г — газообразное. Различные кристаллические модификации твердого состояния отмечены греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и пр.

| Вещество                        | Температура, К   |                  |          |         |                  |                  |                  |                  |                  | Литература |
|---------------------------------|------------------|------------------|----------|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|
|                                 | 20               | 40               | 80       | 150     | 250              | 400              | 600              | 1000             | 1500             |            |
| Азот N <sub>2</sub>             | 681 ( $\alpha$ ) | 1350 ( $\beta$ ) | 1022 (г) | 1048    | 1042             | 1045             | 1075             | 1168             | 1244             | [3, 6]     |
| Алюминий                        | 8,9              | 78               | 376      | 675     | 858              | 951              | 1037 (т)         | 1177 (ж)         | —                | [2, 5]     |
| Аргон                           | 306              | 560              | 836 (т)  | 526 (г) | 521              | 521              | 521              | 521              | 521              | [7]        |
| Барий                           | 67,4             | 135              | 168*1    | 186     | 198              | 259              | 300              | 328 (т)          | 281 (ж)          | [2, 3]     |
| Бериллий                        | 1,61             | 9,96             | 90,6     | 624     | 1560             | 2179             | 2559             | 3060             | 3604             | [2, 5]     |
| Бор аморфный                    | 8,9              | 7,1              | 58*1     | 333     | 859              | 1463             | 1892             | 2337             | —                | [3]        |
| Бор (кр)                        | 2,2              | 1,5              | 42*1     | 299     | 816 ( $\gamma$ ) | 1416 ( $\beta$ ) | 1931             | 2306             | 2597             | [3]        |
| Бром Вг <sub>2</sub>            | 79,6             | 181              | 253      | 308     | 371 (т)          | 230 (г)          | 233              | 236              | 239              | [2]        |
| Ванадий                         | 7,1              | 39               | 174*1    | 370     | 465              | 515              | 540              | 597              | 714              | [3]        |
| Висмут                          | 35               | 74               | 102*1    | 117     | —                | 127 (т)          | 141 (ж)          | —                | —                | [3]        |
| n-Водород*2                     | 9530 (ж)         | 10 570 (г)       | 10 730   | 12 600  | 14 040           | 14 480           | 14 550           | 14 980           | 16 050           | [8]        |
| para-Водород*2                  | 9530 (ж)         | 10 570 (г)       | 11 720   | 16 150  | 15 330           | 14 550           | 14 550           | 14 980           | 16 050           | [8]        |
| Вольфрам                        | 1,89             | 18,4             | 71,5     | 113     | 131              | 136              | 140              | 148              | 158              | [2, 5]     |
| Гадолиний                       | 25,4             | 97               | 163*1    | 208     | 265              | 179              | 185              | 207              | 243              | [3]        |
| Галлий                          | 32,1             | 110              | 221*1    | 316     | 375 (т)          | 394 (ж)          | 382              | 376              | 377              | [3]        |
| Германий                        | 12,5             | 61               | 142*1    | 256     | 310              | 337              | 347              | 375 (т)          | 380 (ж)          | [3]        |
| Гольмий                         | 58               | 124              | 197*1    | 161     | 163              | 169              | 172              | 193              | 271              | [3]        |
| $\alpha$ -диспрозий             | 34,5             | 115              | 201      | 280     | 173              | 173              | 175              | 195              | 274              | [3]        |
| Европий                         | 65               | —                | —        | —       | —                | 184              | 199              | 250              | —                | [3]        |
| Железо*3                        | 4,6              | 30               | 138*1    | 324     | 422              | 489              | 574              | 975 ( $\alpha$ ) | 654 ( $\gamma$ ) | [3]        |
| Золото                          | 15,9             | 57,2             | 99,2     | 119     | 127              | 131              | 135              | 146 (т)          | 159 (ж)          | [3, 5]     |
| Индий                           | 60,8             | 141              | 193      | 218     | 229              | 250 (т)          | 245 (ж)          | 238              | 236              | [2, 5]     |
| Иод I <sub>2</sub>              | 64               | 124              | 171      | 195 (т) | —                | 313 (ж)          | 148 (г)          | 150              | 153              | [2]        |
| Иридий                          | 2,0              | 22               | 68*1     | 110     | 125              | 129,5            | 135              | 150              | —                | [3]        |
| Иттербий                        | 45,7             | 102              | 132*1    | 145     | 151              | 160              | 172              | 184              | —                | [3]        |
| Иттрий                          | 21,3             | 101              | 199*1    | 265     | 292              | 305              | 321              | 354              | 397              | [3]        |
| Кадмий                          | 46               | 117              | 182      | 213     | 227              | 241 (т)          | 264 (ж)          | —                | —                | [3]        |
| Калий                           | 251              | 494              | 610      | 666     | 717 (т)          | 805 (ж)          | 770              | 792              | 926              | [9]        |
| Кальций                         | 36               | 188              | 405      | 575     | —                | 655              | 738 ( $\alpha$ ) | 1020 ( $\beta$ ) | —                | [3]        |
| Кислород, O <sub>2</sub>        | 429 ( $\alpha$ ) | 1289 ( $\beta$ ) | 1689 (ж) | 920 (г) | 915              | 942              | 1003             | 1090             | 1143             | [2, 10]    |
| Кислород, O <sub>3</sub> (озон) | —                | —                | —        | —       | —                | 916 (г)          | 1048             | 1166             | 1243             | [2, 10]    |
| Кобальт                         | 5,4              | 39,6             | 162*1    | 331     | 405              | 450              | 503 ( $\alpha$ ) | 627 ( $\beta$ )  | 674              | [3]        |
| Кремний (кр)                    | 3,37             | 44               | 188      | 426     | 648              | 794              | 871              | 946              | 1013             | [2, 5]     |
| Криптон*2                       | 188              | 276              | 345 (т)  | 258 (г) | 250              | 249              | 248              | 248              | —                | [7]        |
| Ксенон*2                        | 133              | 178              | 202      | 261 (т) | 162 (г)          | 159              | 159              | 158              | —                | [7]        |
| Лантан                          | 46               | 113              | —        | 182     | —                | 197 ( $\alpha$ ) | 197 ( $\beta$ )  | 238              | 247 (ж)          | [3]        |
| $\alpha$ -Литий                 | 55,9             | 350              | 1390     | —       | —                | —                | —                | —                | —                | [3]        |
| $\beta$ -Литий                  | —                | —                | 1340     | 2653    | 3383             | 3974 (т)         | 4251 (ж)         | 4154             | 4203             | [3]        |
| Лютеций                         | 20,9             | 73               | —        | 141     | 151              | 153              | 156              | 173              | 217              | [3]        |
| $\alpha$ -Марганец              | 8,9              | 50,6             | 193*1    | 365     | 454              | 515              | 581              | —                | —                | [3]        |
| $\beta$ , $\delta$ -Марганец    | 21,7             | 71,6             | 201*1    | 378     | 465              | —                | —                | 686 ( $\beta$ )  | 837 ( $\delta$ ) | [3]        |
| $\gamma$ -Марганец              | —                | —                | 190*1    | 372     | 470              | —                | —                | —                | —                | [3]        |
| Медь                            | 7,29             | 58,76            | 202,6    | 322,6   | 373,3            | 397,5            | 416,7            | 451,1 (т)        | 513 (ж)          | [3, 11]    |
| Молибден                        | 2,8              | 23,6             | 104      | 193     | 238              | 264              | 276              | 294              | —                | [2, 5]     |
| $\alpha$ -Мышьяк                | 15,6             | 74,6             | 175      | 275     | 314              | 339              | 354              | 383              | —                | [3]        |
| $\alpha$ -Натрий                | 157              | 531              | —        | —       | —                | —                | —                | —                | —                | [3]        |
| $\beta$ -Натрий                 | 170              | 540              | 879      | 1074    | 1176 (т)         | 1370 (ж)         | 1296             | 1257             | —                | [3, 9]     |
| Неодим                          | 71               | 127              | 176*1    | —       | —                | 200              | 222              | 291              | —                | [3]        |
| Неон*2                          | 945 (т)          | 1066 (г)         | 1035     | 1031    | 1030             | 1030             | 1030             | 1030             | 1030             | [7]        |
| $\alpha$ -Нептуний              | —                | —                | —        | —       | —                | 147              | —                | —                | —                | [3]        |
| Никель                          | 5,8              | 38               | 173      | 328     | 416              | 482              | 592              | 561              | 616              | [3, 5]     |
| Нобий                           | 11,3             | 68               | 173      | 239     | 262              | 270              | 281              | 304              | 333              | [5, 13]    |
| $\beta$ -Олово белое            | 40               | 106              | 173      | 206     | 219              | 243 (т)          | 242 (ж)          | 240              | —                | [3, 5, 13] |
| $\alpha$ -Олово серое           | 32,3             | 76               | 136*1    | —       | —                | —                | —                | —                | —                | [3]        |
| Осмий                           | 1,43             | —                | —        | —       | —                | 132              | 136              | 144              | 154              | [3]        |
| Палладий                        | 9,5              | 52               | 132*1    | 207     | 238              | 251              | 261              | 281              | 307              | [3]        |
| Платина                         | 7,4              | 38               | 88       | 118     | 131              | 136              | 141              | 152              | 165              | [3, 5]     |
| Плутоний                        | 15               | 56               | 74       | 94      | 121              | 138              | 154 (т)          | 171 (ж)          | —                | [3]        |

| Вещество             | Температура, К |         |          |         |         |          |         |         |         | Литература |
|----------------------|----------------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|------------|
|                      | 20             | 40      | 80       | 150     | 250     | 400      | 600     | 1000    | 1500    |            |
| Празеодим            | 94,4           | 174     | 186      | 191     | 193     | 202      | 224     | 286 (т) | 305 (ж) | [3]        |
| Рений                | 2,8            | 27      | 75*1     | 120     | 132     | 139      | 145     | 158     | —       | [3, 5]     |
| Родий                | 2,71           | 26,6    | 114      | 195     | 234     | 253      | 273     | 310     | 349     | [3, 12]    |
| Ртуть                | 51,5           | 89,5    | 116      | 129 (т) | 142 (ж) | 137      | 137     | 136     | —       | [12, 13]   |
| Рутений              | 1,71           | 19      | 99       | 185     | 230     | 241      | 251     | 278     | 315     | [3, 12]    |
| Самарий              | 49             | 122     | 204*1    | 175     | 188     | 221      | 271     | 301     | —       | [3]        |
| Свинец               | 53             | 94,4    | 114      | 122     | 127     | 134      | 144 (т) | 142 (ж) | 138     | [2, 5]     |
| γ-Селен              | 43,5           | 108     | 193*1    | 274     | 309     | 354 (т)  | 445 (ж) | —       | —       | [3]        |
| Сера ромбическая     | 80,6           | 192     | 340      | 517     | —       | —        | —       | —       | —       | [14]       |
| Сера моноклинная*3   | —              | —       | 342      | 535     | 692 (т) | 1004 (ж) | 1068    | 1004    | —       | [3]        |
| Серебро              | 15,5           | 78      | 166      | 212     | 232     | 239      | 250     | 277 (т) | 310 (ж) | [3, 5]     |
| Скандий              | 13,9           | 95,4    | 289      | —       | —       | 585      | 611     | 694     | 848     | [2, 5]     |
| Стронций             | 54             | —       | —        | —       | —       | 313      | 343 (α) | 441 (γ) | 411 (ж) | [2]        |
| Сурьма               | 25,8           | 83      | 147*1    | 190     | 204     | 213      | 223 (т) | 258 (ж) | —       | [3]        |
| α-Таллий             | 50             | 93      | 114*1    | 124     | 128     | 134 (т)  | 145 (ж) | —       | —       | [3]        |
| Тантал               | 8,23           | 43      | 97,6     | 126     | 137     | 141      | 145     | 152     | 163     | [2, 5]     |
| Теллур               | 33,5           | 88      | 151      | 180     | 193     | 219      | 253 (т) | 295 (ж) | —       | [3, 5]     |
| Тербий               | 27,4           | 106     | 176*1    | 234     | 199     | 179      | 188     | 226     | 286     | [3]        |
| Технеций             | —              | —       | —        | —       | —       | 211      | 225     | 290     | 324     | [3]        |
| Титан                | 7,0            | 57      | 230      | 406     | 498     | 548      | 597     | 684     | 687     | [2, 5]     |
| α-Торий              | 20             | 61      | 90*1     | 108     | 115     | 123      | 134     | 156     | —       | [3]        |
| Туллий               | 63             | 187     | 146*1    | 154     | 158     | 161      | 163     | 186     | 209     | [3]        |
| Углерод (алмаз)      | 0,21           | 1,18    | 7,0      | 83      | 344     | 854      | 1342    | 1799    | —       | [2, 3]     |
| Углерод (графит)     | 6,3            | 27,9    | 87*1     | 269     | 568     | 994      | 1409    | 1799    | 2019    | [2, 3, 58] |
| Уран                 | 13,5           | 54      | 83*1     | 103     | 112     | 125      | 146 (α) | 180 (β) | 201 (ж) | [3]        |
| Фосфор белый         | 151            | 303     | 403      | 559     | 728 (т) | 843 (ж)  | —       | —       | —       | [2]        |
| Фосфор красный       | 27,3           | 89      | 198*1    | 436     | 626     | 748      | 832     | —       | —       | [3]        |
| Фосфор черный        | 13,4           | 73      | 204*1    | 447     | 639     | 850      | —       | —       | —       | [3]        |
| Фтор F <sub>2</sub>  | 347            | 969 (т) | 1502 (ж) | —       | —       | 869 (г)  | 928     | 979     | 1009    | [3]        |
| Хлор Cl <sub>2</sub> | 108            | 340     | 543 (т)  | —       | —       | 634 (г)  | 642     | 627     | 605     | [3]        |
| Хром                 | 2,1            | 17      | 127      | 314     | 425     | 482      | 516     | 614     | 806     | [2, 5]     |
| Цезий                | 147            | 179     | 192      | 203     | 220 (т) | 240 (ж)  | 224     | 230     | 273     | [9]        |
| Церий                | 61,5 (β)       | —       | —        | —       | —       | 202 (γ)  | 223     | 268 (т) | 269 (ж) | [3]        |
| Цинк                 | 26             | 125     | 258      | 293     | 380     | 402      | 436 (т) | 480 (ж) | —       | [3, 5]     |
| Цирконий             | 11,7           | 68      | 165*1    | 244     | 273     | 300      | 321     | 362 (α) | 344 (β) | [3]        |
| Эрбий*3              | 126            | 144     | 195      | 155     | 165     | 170      | 174     | 192     | 229     | [3]        |

\*1 При T — 75 К.

\*2 См. также табл. 9.5.

\*3 См. также рис. 9.2—9.10.

Таблица 9.3. Удельная теплоемкость  $c_p$ , Дж/(кг·К) элементов при температуре от 1 до 15 К и давлении 0.1 МПа (н) — в нормальном (несверхпроводящем) состоянии; (с) — в сверхпроводящем состоянии

| Вещество    | Температура, К |       |       |       |       |      |      |      | Литература |
|-------------|----------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------------|
|             | 1              | 2     | 3     | 4     | 5     | 8    | 10   | 15   |            |
| α-Азот      | —              | —     | 3,5   | 8,7   | 17,3  | —    | 167  | 422  | [3]        |
| Алюминий    | —              | 0,11  | —     | 0,30  | —     | —    | 1,41 | 4,6  | [5]        |
| Аргон       | 0,06           | 0,49  | —     | 4,35  | —     | 42,5 | 83,3 | —    | [7]        |
| Барий       | —              | 0,12  | 0,34  | 0,78  | 1,54  | —    | 14   | 38,5 | [3]        |
| Бериллий    | 0,025          | 0,051 | 0,079 | 0,109 | 0,144 | 0,27 | 0,39 | 0,84 | [5]        |
| Бром        | —              | —     | —     | —     | 2     | —    | 16   | 45   | [3]        |
| Ванадий (н) | 0,19           | 0,38  | 0,58  | 0,80  | 1,04  | —    | 2,34 | 4,24 | [3]        |
| Ванадий (с) | 0,005          | 0,2   | 0,7   | 1,45  | 2,43  | —    | —    | —    | [3]        |



| Вещество                | Температура, К |        |        |        |        |        |        |       | Литература |
|-------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------------|
|                         | 1              | 2      | 3      | 4      | 5      | 8      | 10     | 15    |            |
| Висмут                  | 0,006          | 0,046  | 0,17   | 0,49   | —      | 5,47   | 10,4   | 23,8  | [12]       |
| пара-Водород            | —              | 4,98   | 17,4   | 43     | 89     | 450    | 1030   | 7100  | [12, 13]   |
| Гадолиний               | 0,08           | 0,16   | 0,27   | 0,4    | 0,56   | —      | 3,9    | 12,1  | [3]        |
| Галлий                  | —              | 0,024  | 0,051  | 0,1    | 0,19   | —      | 3,46   | 14,8  | [3]        |
| Гафний                  | 0,014          | 0,033  | 0,06   | 0,096  | 0,148  | —      | —      | —     | [3]        |
| Гелий (г) $^4\text{He}$ | —              | —      | —      | —      | 6800   | 5550   | 5420   | 5300  | [16]       |
| Гелий (ж) $^4\text{He}$ | 110            | 5000   | 3840   | 4080   | —      | —      | —      | —     | [4]        |
| Гелий (ж) $^3\text{He}$ | 1430           | 2500   | —      | —      | —      | —      | —      | —     | [4]        |
| Германий                | 0,0006         | 0,0046 | 0,0155 | 0,036  | 0,069  | —      | 0,86   | 4,43  | [3]        |
| Гольмий                 | 18,7           | 6,24   | 3,37   | 2,74   | 3,22   | —      | 16,4   | 39,8  | [3]        |
| орто-Дейтерий           | —              | 6,5    | 22,6   | 55,5   | 113    | 545    | 1130   | —     | [12]       |
| $\alpha$ -Диспрозий     | 0,24           | 0,17   | 0,22   | 0,32   | 0,54   | —      | 3,9    | 15,5  | [3]        |
| Европий                 | 0,24           | 1,3    | 2,9    | 4,9    | 7,4    | —      | 26     | 57    | [3]        |
| $\alpha$ -Железо        | 0,09           | 0,18   | 0,28   | 0,38   | 0,5    | 0,9    | 1,24   | 2,49  | [5]        |
| Золото                  | 0,006          | 0,025  | 0,07   | 0,16   | 0,29   | 1,2    | 2,2    | 7,4   | [5]        |
| Индий (н)               | 0,029          | 0,138  | 0,41   | 0,95   | 2,27   | 8,55   | 15,5   | 36,7  | [5]        |
| Индий (с)               | 0,019          | 0,142  | 0,464  | —      | —      | —      | —      | —     | [12]       |
| Иод                     | —              | —      | —      | —      | 2,3    | —      | 16     | 40    | [3]        |
| Иридий                  | —              | 0,034  | 0,053  | 0,075  | 0,10   | —      | 0,31   | 0,83  | [3]        |
| Иттербий                | 0,02           | 0,087  | 0,23   | 0,50   | 0,98   | —      | 8,5    | 25,3  | [3]        |
| Иттрий                  | 0,10           | 0,20   | 0,32   | 0,46   | 0,64   | 1,5    | 2,6    | 8,6   | [17]       |
| Кадмий                  | 0,008          | 0,029  | 0,087  | 0,234  | 0,577  | 3,98   | 8,62   | 25,9  | [17]       |
| Калний                  | 0,12           | —      | 2,24   | 5,45   | —      | 42,0   | 71,5   | —     | [9]        |
| $\alpha$ -Кальций       | 0,08           | 0,18   | 0,32   | 0,53   | 0,86   | —      | 5,3    | 16,2  | [3]        |
| $\alpha$ -Кислород      | —              | —      | —      | 3,9    | 7,8    | —      | 69     | 224   | [3]        |
| Кобальт                 | 0,08           | 0,16   | 0,25   | 0,35   | 0,47   | —      | 1,22   | 2,53  | [3]        |
| Кремний                 | 0,0003         | 0,002  | 0,007  | 0,018  | 0,03   | —      | 0,28   | 1,1   | [3]        |
| Криптон                 | 0,064          | 0,53   | —      | 4,82   | —      | 42,0   | 71,5   | —     | [7]        |
| Ксенон                  | 0,057          | 0,49   | —      | 4,74   | —      | 38,1   | 58,3   | 103   | [7]        |
| $\alpha$ -Лантан (н)    | 0,07           | 0,15   | 0,31   | 0,54   | 0,91   | —      | 8,2    | 25    | [3]        |
| $\alpha$ -Лантан (с)    | 0,006          | 0,10   | 0,36   | 0,83   | 0,97   | —      | —      | —     | [3]        |
| $\beta$ -Лантан (н)     | 0,09           | 0,20   | 0,38   | 0,66   | 1,11   | —      | —      | —     | [3]        |
| $\beta$ -Лантан (с)     | 0,006          | 0,08   | 0,34   | 0,83   | 1,56   | —      | —      | —     | [3]        |
| Литий                   | 0,24           | 0,54   | 0,90   | 1,39   | 2,02   | —      | 9,3    | 25,7  | [3]        |
| Лютеций                 | 0,07           | 0,14   | 0,22   | 0,33   | 0,49   | 1,43   | 2,75   | —     | [3]        |
| Магний                  | 0,055          | 0,117  | 0,19   | 0,29   | 0,44   | 1,08   | 1,9    | 5,8   | [5]        |
| $\alpha$ -Марганец      | 0,25           | 0,50   | 0,75   | 1,01   | 1,29   | 2,16   | 2,82   | 5,21  | [5]        |
| Медь                    | 0,0116         | 0,0278 | 0,0530 | 0,0916 | 0,1482 | 0,4729 | 0,8709 | 2,907 | [11, 18]   |
| Молибден                | 0,02           | 0,04   | 0,065  | 0,09   | 0,13   | —      | 0,48   | 1,00  | [3]        |
| Мышьяк                  | 0,004          | 0,014  | 0,04   | 0,09   | 0,18   | —      | 1,5    | 6,1   | [3]        |
| $\alpha$ -Натрий        | 0,08           | 0,30   | 0,76   | 1,6    | 2,8    | —      | 22,7   | 74    | [3]        |
| $\beta$ -Натрий         | —              | —      | —      | 1,78   | 3,42   | —      | 28,4   | 85    | [3]        |
| Неодим                  | 1,07           | 5,0    | 11,0   | 18,9   | 27,2   | 41,5   | 36,5   | 51,9  | [3]        |
| Неон                    | 0,24           | 1,96   | —      | 17,7   | —      | 159    | 278    | —     | [7]        |
| Никель                  | 0,12           | 0,24   | 0,37   | 0,50   | 0,67   | 1,19   | 1,62   | 3,1   | [5]        |
| Ниобий (н)              | 0,09           | 0,18   | 0,28   | 0,40   | —      | 1,4    | 2,2    | 5,5   | [12]       |
| Ниобий (с)              | 0,001          | 0,014  | 0,087  | 0,27   | 0,56   | 2,28   | —      | —     | [19]       |
| $\alpha$ -Олово         | 0,0002         | 0,0014 | 0,005  | 0,12   | 0,46   | —      | 6,0    | 18,9  | [3]        |
| $\beta$ -Олово (н)      | 0,017          | 0,047  | 0,109  | 0,245  | —      | 4,2    | 8,1    | 22,6  | [12]       |
| $\beta$ -Олово (с)      | 0,004          | 0,048  | 0,151  | —      | —      | —      | —      | —     | [12]       |
| Осмий                   | —              | 0,025  | 0,04   | 0,06   | —      | —      | —      | —     | [3]        |
| Палладий                | 0,09           | 0,18   | 0,29   | 0,42   | 0,56   | —      | 1,9    | 4,6   | [3]        |
| Платина                 | 0,03           | 0,07   | 0,12   | 0,18   | 0,27   | —      | 1,17   | 3,5   | [3]        |
| $\alpha$ -Плутоний      | —              | —      | —      | —      | —      | —      | 3      | 9     | [3]        |
| Празеодим               | 0,35           | 0,63   | 1,3    | 2,4    | 4,3    | 18,1   | 29,2   | 60    | [3]        |
| Рений (н)               | 0,015          | 0,025  | 0,04   | 0,06   | 0,08   | —      | 0,29   | 0,9   | [3]        |
| Родий                   | 0,048          | 0,097  | 0,147  | 0,201  | —      | 0,47   | 0,65   | 1,35  | [12]       |
| Ртуть (н)               | 0,036          | 0,48   | 2,07   | 4,09   | —      | 17,5   | 23,5   | 38    | [12]       |
| Ртуть (с)               | 0,029          | 0,48   | 2,09   | 4,17   | —      | —      | —      | —     | [12]       |
| Рубидий                 | 0,16           | —      | 4,36   | 10,4   | —      | 54     | 81     | —     | [9]        |
| Рутений                 | 0,03           | 0,06   | 0,10   | 0,13   | 0,17   | —      | 0,41   | 0,87  | [3]        |
| Самарий                 | 0,14           | 0,23   | 0,43   | 0,78   | 1,45   | —      | 17,5   | 37    | [3]        |
| Свинец (н)              | —              | 0,094  | 0,281  | 0,684  | 1,48   | 7,37   | 13,7   | 33,5  | [5]        |

| Вещество               | Температура, К |        |        |       |       |      |      |      | Литература |
|------------------------|----------------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|------------|
|                        | 1              | 2      | 3      | 4     | 5     | 8    | 10   | 15   |            |
| Свинец (с)             | —              | 0,067  | 0,251  | 0,672 | 1,51  | —    | —    | —    | [20]       |
| Селен                  | 0,007          | 0,056  | 0,19   | 0,49  | 1,0   | —    | 7,9  | 23,8 | [3]        |
| Сера ромбическая       | —              | —      | —      | —     | 1,69  | —    | 15,4 | 46   | [14]       |
| Серебро                | 0,0072         | 0,0239 | 0,0595 | 0,124 | —     | 0,91 | 1,8  | 6,4  | [12]       |
| Скандий                | 0,267          | 0,505  | 0,747  | 1,00  | 1,3   | 2,5  | 3,31 | 7,0  | [5]        |
| Стронций               | 0,05           | 0,14   | 0,31   | 0,61  | 1,09  | —    | 8,45 | 27   | [3]        |
| Сурьма                 | 0,002          | 0,016  | 0,055  | 0,11  | 0,3   | —    | 3,5  | 12,3 | [3]        |
| Таллий (н)             | —              | 0,06   | 0,43   | 1,02  | 2,0   | —    | 15,3 | 33   | [3]        |
| Тантал (н)             | 0,032          | 0,068  | 0,112  | 0,171 | 0,26  | 0,65 | 1,17 | 3,6  | [5]        |
| Тантал (с)             | 0,006          | 0,054  | 0,178  | 0,352 | —     | —    | —    | —    | [12]       |
| Теллур                 | 0,005          | 0,039  | 0,14   | 0,33  | 0,65  | —    | 7,01 | 20,3 | [3]        |
| Тербий                 | 1,45           | 0,50   | 0,43   | 0,55  | 0,68  | —    | 3,7  | 14,3 | [3]        |
| Титан                  | 0,071          | 0,146  | 0,226  | 0,317 | 0,42  | 0,84 | 1,26 | 3,3  | [5]        |
| $\alpha$ -Торий        | —              | 0,05   | 0,11   | 0,19  | 0,42  | —    | 2,9  | 9,4  | [3]        |
| Тулий                  | 0,25           | 0,38   | 0,79   | 1,44  | 2,35  | —    | 11,6 | 32,7 | [3]        |
| Углерод (графит)       | 0,003          | 0,018  | 0,052  | 0,11  | 0,17  | —    | 1,05 | 3,5  | [3, 5]     |
| $\alpha$ -Уран         | 0,044          | 0,097  | 0,17   | 0,26  | 0,38  | —    | 1,76 | 5,9  | [3]        |
| $\alpha$ -Фосфор белый | —              | —      | —      | —     | 3,5   | —    | 36,2 | 97   | [2]        |
| Хлор                   | —              | —      | —      | —     | —     | —    | 20   | 54   | [3]        |
| Хром                   | 0,03           | 0,06   | 0,10   | 0,14  | 0,18  | —    | 0,49 | 1,09 | [3]        |
| Цезий                  | 0,28           | —      | 8,3    | 16    | —     | 61   | 83   | —    | [9]        |
| $\alpha$ -Церий        | 0,15           | 0,33   | 0,55   | 0,83  | —     | —    | —    | —    | [3]        |
| $\beta$ -Церий         | —              | 1,1    | 2,3    | 4,6   | 7,9   | —    | 43   | 47   | [3]        |
| Цинк                   | 0,01           | 0,027  | 0,055  | 0,105 | 0,191 | 0,96 | 2,36 | 11,2 | [17]       |
| Цирконий               | 0,03           | 0,07   | 0,12   | 0,18  | 0,26  | —    | 1,3  | 4,36 | [3]        |
| Эрбий                  | 0,26           | 0,24   | 0,38   | —     | —     | —    | —    | 40   | [3]        |

Таблица 9.4. Удельная теплоемкость  $c_s$ , кДж/(кг · К), жидкого гелия  $^4\text{He}$  под давлением насыщенных паров [21] при различной температуре (К)

| $T, K$ | $c_s$ | $T, K$ | $c_s$ | $T, K$ | $c_s$ | $T, K$ | $c_s$ | $T, K$ | $c_s$ |
|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 1,8    | 2,81  | 2,1    | 7,51  | 2,4    | 2,38  | 3,4    | 2,97  | 4,4    | 5,11  |
| 1,85   | 3,26  | 2,15   | 9,35  | 2,6    | 2,27  | 3,6    | 3,26  | 4,6    | 5,94  |
| 1,9    | 3,79  | 2,17   | 12,60 | 2,8    | 2,34  | 3,8    | 3,60  | 4,8    | 7,53  |
| 2,0    | 5,18  | 2,2    | 3,98  | 3,0    | 2,49  | 4,0    | 3,99  | 5,0    | 11,5  |
| 2,05   | 6,16  | 2,3    | 2,64  | 3,2    | 2,69  | 4,2    | 4,48  | 5,05   | 13,5  |

Таблица 9.5. Зависимость удельной изобарной теплоемкости  $c_p$ , кДж/(кг · К), элементов в жидком и газообразном состояниях от давления и температуры

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе

| T, К                    | Давление, МПа |       |       |       | T, К | Давление, МПа |       |       |       |
|-------------------------|---------------|-------|-------|-------|------|---------------|-------|-------|-------|
|                         | 0,1           | 1     | 10    | 100   |      | 0,1           | 1     | 10    | 100   |
| Азот N <sub>2</sub> [6] |               |       |       |       |      |               |       |       |       |
| 70                      | 2,023         | 2,012 | 1,903 | —     | 300  | 1,041         | 1,056 | 1,197 | 1,355 |
| 80                      | 1,022         | 2,089 | 1,997 | —     | 400  | 1,045         | 1,053 | 1,121 | 1,271 |
| 90                      | 1,068         | 2,099 | 1,968 | 1,701 | 600  | 1,075         | 1,078 | 1,104 | 1,201 |
| 100                     | 1,069         | 2,269 | 1,998 | 1,774 | 800  | 1,122         | 1,124 | 1,137 | 1,198 |
| 120                     | 1,057         | 1,309 | 2,220 | 1,685 | 1000 | 1,168         | 1,168 | 1,176 | 1,216 |
| 150                     | 1,048         | 1,144 | 2,851 | 1,555 | 1200 | 1,204         | 1,204 | 1,209 | 1,238 |
| 200                     | 1,043         | 1,083 | 1,619 | 1,484 | 1500 | 1,244         | 1,244 | 1,247 | 1,266 |

| T, К | Давление, МПа |   |    |     | T, К | Давление, МПа |   |    |     |
|------|---------------|---|----|-----|------|---------------|---|----|-----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |

## Аргон Ar [7]

|     |              |              |       |       |      |       |       |       |       |
|-----|--------------|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 85  | <u>1,057</u> | 1,055        | —     | —     | 200  | 0,522 | 0,556 | 1,232 | 0,858 |
| 100 | 0,542        | <u>1,152</u> | 1,093 | —     | 300  | 0,521 | 0,532 | 0,645 | 0,815 |
| 120 | 0,532        | 0,722        | 1,161 | 0,942 | 500  | 0,521 | 0,521 | 0,552 | 0,657 |
| 150 | 0,526        | 0,609        | 1,549 | 0,903 | 1300 | 0,521 | 0,521 | 0,526 | 0,556 |

n-Водород H<sub>2</sub> [8]

|     |             |              |       |       |      |       |       |       |       |
|-----|-------------|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 15  | 6,98        | 6,8          | —     | —     | 200  | 13,53 | 13,59 | 14,07 | 14,82 |
| 20  | <u>9,53</u> | 9,17         | 7,61  | —     | 300  | 14,31 | 14,33 | 14,54 | 15,14 |
| 30  | 10,83       | <u>23,26</u> | 10,60 | —     | 600  | 14,55 | 14,55 | 14,59 | 14,97 |
| 50  | 10,48       | 12,12        | 15,53 | 9,64  | 1000 | 14,98 | 14,98 | 14,66 | 15,01 |
| 100 | 11,22       | 11,50        | 13,51 | 12,13 | 2000 | 18,27 | 17,41 | 17,14 | 17,04 |

пара-Водород H<sub>2</sub> [8]

|    |             |              |       |     |      |       |       |       |       |
|----|-------------|--------------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| 15 | 6,98        | 6,8          | —     | —   | 100  | 13,43 | 13,70 | 15,71 | 14,34 |
| 20 | <u>9,53</u> | 9,17         | 7,51  | —   | 200  | 16,08 | 16,14 | 16,52 | 17,36 |
| 25 | 11,16       | 12,58        | 9,12  | —   | 500  | 14,52 | 14,53 | 14,59 | 14,82 |
| 30 | 10,83       | <u>23,26</u> | 10,6  | —   | 1000 | 14,98 | 14,98 | 14,99 | 15,01 |
| 50 | 10,54       | 12,18        | 15,59 | 9,7 | 2000 | 18,19 | 17,33 | 17,06 | 16,96 |

| T, К | Давление, МПа |      |      |     |     |     |   |    |    |
|------|---------------|------|------|-----|-----|-----|---|----|----|
|      | 0,01          | 0,02 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 10 | 70 |

Гелий <sup>4</sup>He [16]

|      |      |             |             |             |              |      |      |      |      |
|------|------|-------------|-------------|-------------|--------------|------|------|------|------|
| 2,5  | 5,82 | <u>2,12</u> | 2,10        | 2,05        | 1,98         | 1,80 | 1,6  | —    | —    |
| 3    | 5,55 | 6,08        | <u>2,40</u> | 2,35        | 2,28         | 2,12 | 1,95 | —    | —    |
| 4    | 5,35 | 5,52        | 6,40        | <u>4,08</u> | 3,68         | 3,12 | 2,72 | 1,82 | —    |
| 5    | 5,28 | 5,38        | 5,75        | 6,78        | <u>17,02</u> | 4,85 | 3,70 | 2,25 | —    |
| 6    | 5,25 | 5,32        | 5,52        | 6,00        | 7,78         | 9,55 | 4,80 | 2,58 | —    |
| 8    | 5,22 | 5,25        | 5,38        | 5,55        | 6,02         | 8,42 | 8,20 | 3,12 | —    |
| 10   | 5,22 | 5,25        | 5,30        | 5,42        | 5,65         | 6,58 | 7,62 | 3,62 | —    |
| 20   | 5,20 | 5,20        | 5,22        | 5,25        | 5,30         | 5,48 | 5,72 | 5,18 | 3,82 |
| 50   | 5,20 | 5,20        | 5,20        | 5,20        | 5,22         | 5,22 | 5,28 | 5,60 | 5,00 |
| 100  | 5,20 | 5,20        | 5,20        | 5,20        | 5,20         | 5,20 | 5,22 | 5,32 | 5,45 |
| 1400 | 5,20 | 5,20        | 5,20        | 5,20        | 5,20         | 5,20 | 5,20 | 5,20 | —    |

| T, К | Давление, МПа |   |    |    | T, К | Давление, МПа |   |    |    |
|------|---------------|---|----|----|------|---------------|---|----|----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 50 |      | 0,1           | 1 | 10 | 50 |

Кислород O<sub>2</sub> [10]

|     |              |              |       |       |      |       |       |       |       |
|-----|--------------|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 70  | 1,696        | 1,694        | 1,676 | 1,628 | 150  | 0,920 | 1,039 | 2,204 | 1,537 |
| 80  | 1,689        | 1,687        | 1,663 | 1,599 | 200  | 0,915 | 0,957 | 1,904 | 1,511 |
| 90  | <u>1,686</u> | 1,681        | 1,645 | 1,562 | 300  | 0,920 | 0,934 | 1,084 | 1,319 |
| 100 | 0,968        | 1,709        | 1,651 | 1,541 | 400  | 0,942 | 0,949 | 1,015 | 1,170 |
| 110 | 0,947        | <u>1,780</u> | 1,681 | 1,532 | 600  | 1,003 | 1,006 | 1,031 | —     |
| 120 | 0,935        | 1,311        | 1,742 | 1,531 | 1000 | 1,090 | 1,091 | 1,099 | —     |

| T, К                 | Давление, МПа |       |       |       | T, К                 | Давление, МПа |       |       |       |
|----------------------|---------------|-------|-------|-------|----------------------|---------------|-------|-------|-------|
|                      | 0,1           | 1     | 10    | 100   |                      | 0,1           | 1     | 10    | 100   |
| <i>Криптон К [7]</i> |               |       |       |       | <i>Ксенон Хе [7]</i> |               |       |       |       |
| 120                  | 0,263         | 0,543 | 0,531 | —     | 170                  | 0,168         | 0,348 | 0,339 | —     |
| 150                  | 0,258         | 0,557 | 0,520 | 0,441 | 200                  | 0,165         | 0,356 | 0,338 | 0,294 |
| 200                  | 0,252         | 0,291 | 0,776 | 0,502 | 300                  | 0,160         | 0,178 | 0,699 | 0,286 |
| 300                  | 0,249         | 0,259 | 0,424 | 0,404 | 500                  | 0,159         | 0,163 | 0,208 | 0,248 |
| 500                  | 0,248         | 0,251 | 0,281 | 0,353 | 1000                 | 0,158         | 0,159 | 0,167 | 0,198 |
| 1300                 | 0,248         | 0,248 | 0,251 | 0,268 | 1300                 | 0,158         | 0,159 | 0,163 | 0,183 |
| <i>Неон Не [7]</i>   |               |       |       |       |                      |               |       |       |       |
| 30                   | 1,129         | 2,027 | 1,852 | —     | 70                   | 1,037         | 1,103 | 1,973 | 1,467 |
| 40                   | 1,066         | 1,818 | 2,030 | 1,500 | 100                  | 1,033         | 1,062 | 1,339 | 1,426 |
| 50                   | 1,042         | 1,267 | 2,557 | 1,490 | 200                  | 1,031         | 1,037 | 1,089 | 1,235 |
| 60                   | 1,039         | 1,147 | 2,603 | 1,479 | 1000                 | 1,030         | 1,030 | 1,031 | 1,035 |

Таблица 9.6. Дебаевский параметр  $\theta$ , К, и коэффициент электронной теплоемкости  $\gamma$ , мДж/(моль · К<sup>2</sup>), для элементов [22]

Везде, где возможно, дано значение  $\theta$  при предельно низкой температуре; обозначения:  
кр — кристаллический; ам — аморфный

| Вещество             | $\theta$ , К | $\gamma$ | Вещество                   | $\theta$ , К | $\gamma$ |
|----------------------|--------------|----------|----------------------------|--------------|----------|
| Азот [23]            | 81           | 0        | Кальций                    | 229          | 2,73     |
| Алмаз                | 2250         | 0        | $\alpha$ -Кислород [28]    | 126          | 0        |
| Алюминий             | 433          | 1,35     | $\gamma$ -Кислород [29]    | 46           | 0        |
| Америций             | 121          | 27       | Кобальт                    | 460          | 4,4      |
| Аргон                | 92           | 0        | Кремний (кр)               | 645          | 0        |
| Барий                | 111          | 2,7      | Кремний (ам) [27]          | 528          | 0        |
| Бериллий             | 1481         | 0,17     | Криптон                    | 72           | 0        |
| Бор (кр) [22, 4]     | 1219—1480    | 0        | Ксенон                     | 64           | 0        |
| Бор (ам) [4]         | 1102         | 0        | Кюрий                      | 123          | —        |
| Бром [4]             | 111          | 0        | $\alpha$ -Лантан           | 150          | 9,45     |
| Ванадий [29]         | 382          | 9,82     | $\beta$ -Лантан            | 140          | 11,5     |
| Висмут               | 120          | 0,0085   | Литий                      | 344          | 1,65     |
| пара-Водород [12]    | 122          | 0        | Лютеций                    | 183          | 8,19     |
| Вольфрам             | 383          | 1,01     | Магний                     | 403          | 1,26     |
| Гадолиний            | 182          | 6,38     | Марганец                   | 409          | 12,8     |
| Галлий               | 326          | 0,60     | Медь                       | 347          | 0,69     |
| Гафний               | 252          | 2,15     | Молибден                   | 423          | 1,83     |
| Гелий, г. п. у. [26] | 27           | 0        | Мышьяк (кр)                | 282          | 0,19     |
| Германий (кр)        | 373          | 0        | Мышьяк (ам) [27]           | 159          | —        |
| Германий (ам) [27]   | 315          | 0        | Натрий                     | 156          | 1,38     |
| Гольмий              | 190          | 6 (1)    | Неодим                     | 163          | —        |
| Графит               | 413          | 0,014    | Неон                       | 75           | 0        |
| орто-Дейтерий [12]   | 114          | 0        | Нептуний                   | 259          | 1,37     |
| Диспрозий            | 183          | —        | Никель                     | 477          | 7,04     |
| Европий              | 118          | 6 (1)    | Ниобий                     | 276          | 7,8      |
| Железо               | 477          | 4,9      | $\alpha$ -Олово серое [12] | 212          | 0        |
| Золото               | 162          | 0,69     | $\beta$ -Олово белое       | 200          | 1,78     |
| Индий                | 112          | 1,66     | Осмий                      | 467          | 2,05     |
| Иод                  | 109          | 0        | Палладий                   | 271          | 9,45     |
| Иридий               | 420          | 3,14     | Платина                    | 237          | 6,54     |
| Иттербий             | 118          | 2,9      | Плутоний                   | 206          | 25 (1)   |
| Иттрий               | 248          | 8,2      | Празеодим                  | 152          | —        |
| Кадмий               | 210          | 0,69     | Протактиний                | 185          | 5        |
| Калний               | 91           | 2,08     | Рений                      | 418          | 2,29     |

| Вещество        | $\theta, K$ | $\gamma$ | Вещество         | $\theta, K$ | $\gamma$ |
|-----------------|-------------|----------|------------------|-------------|----------|
| Родий           | 512         | 4,65     | Тербий           | 176         | 4,1      |
| Ртуть           | 72          | 1,86     | Технеций         | 454         | 4,0      |
| Рубидий         | 56          | 2,63     | Титан            | 420         | 3,36     |
| Рутений         | 555         | 3,1      | Торий            | 160         | 4,08     |
| Самарий         | 169         | 13,5     | Тулий            | 200         | —        |
| Свинец          | 105         | 2,99     | Углерод (алмаз)  | 2250        | 0        |
| Селен (кр)      | 152         | 0        | Углерод (графит) | 413         | 0,014    |
| Селен (ам) [29] | 123         | 0        | Уран             | 248         | 8,14     |
| Сера [4, 12]    | 165—180     | 0        | Фтор [4]         | 78          | 0        |
| Серебро         | 227         | 0,64     | Хлор [4]         | 115         | 0        |
| Скандий         | 346         | 10,3     | Хром             | 606         | 1,42     |
| Стронций        | 147         | 3,64     | Цезий            | 40          | 3,97     |
| Сурьма          | 220         | 0,12     | Церий            | 179         | 12,8     |
| Таллий          | 78          | 1,47     | Цинк             | 329         | 0,64     |
| Тантал [22, 30] | 245         | 5,4—6,9  | Цирконий         | 290         | 2,77     |
| Теллур          | 152         | 0        | Эрбий [22, 31]   | 188         | 10       |

Таблица 9.7. Зависимость дебаевской функции теплоемкости  $D(\theta/T)$  от  $\theta/T$  [32]

| $\theta/T$    | 0 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|---------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $D(\theta/T)$ | 1 | 0,952 | 0,825 | 0,663 | 0,503 | 0,369 | 0,266 | 0,191 | 0,138 | 0,101 | 0,076 |

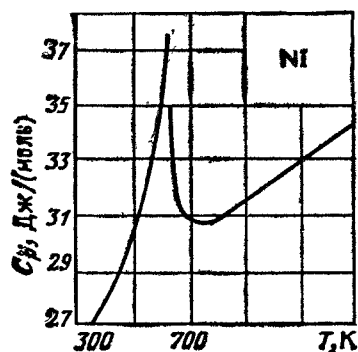


Рис. 9.6. Молярная теплоемкость никеля вблизи ферромагнитного фазового перехода [54]

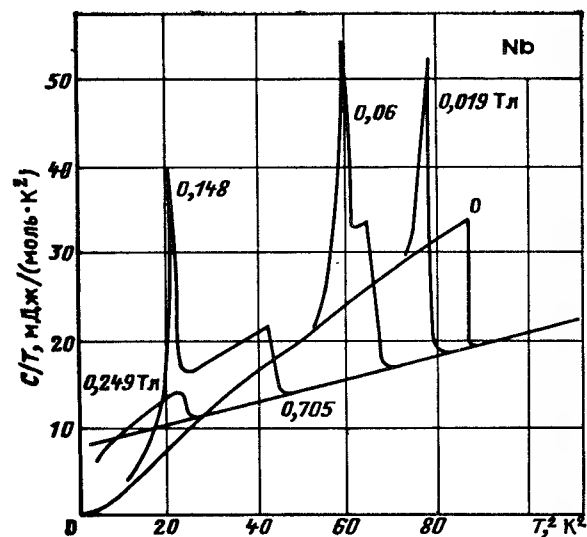


Рис. 9.7. Молярная теплоемкость ниобия при различных значениях магнитной индукции [55]

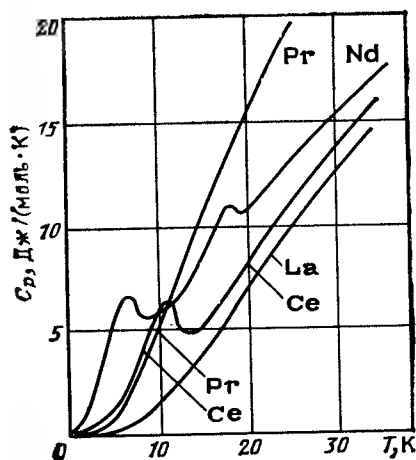


Рис. 9.8. Молярная теплоемкость лантана, неодима, празеодима и церия [4]

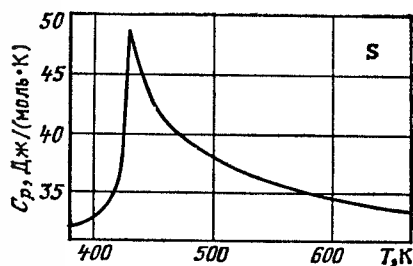


Рис. 9.9. Молярная изобарная теплоемкость жидкой серы [4]

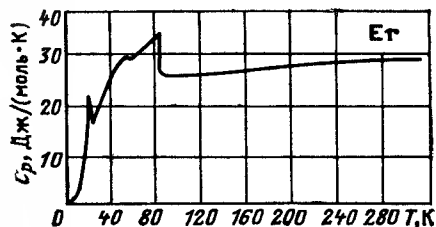


Рис. 9.10. Молярная теплоемкость эрбия [4]

### 9.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В табл. 9.8—9.11 приведены значения теплоемкости для различных неорганических соединений.

Таблица 9.8. Дебаевский параметр  $\theta$ , К, и коэффициент электронной теплоемкости  $\gamma$ , мДж/(моль · К<sup>2</sup>), для неорганических соединений

| Вещество         | Формула                        | $\theta$ | $\gamma$ | Литература |
|------------------|--------------------------------|----------|----------|------------|
| Ванадия галлид   | V <sub>3</sub> Ga              | 302      | 97       | [34]       |
| Ванадия германид | V <sub>3</sub> Ge              | 392      | 30       | [35]       |
| Ванадия силицид  | V <sub>3</sub> Si              | 501      | 62       | [35]       |
| Галлия антимонид | GaSb                           | 269      | 0,002    | [18]       |
| Галлия арсенид   | GaAs                           | 345      | 0,0008   | [18]       |
| Железа сульфид   | FeS <sub>2</sub>               | 645      | 0        | [12]       |
| Индия антимонид  | InSb                           | 206      | 0        | [18]       |
| Индия арсенид    | InAs                           | 251      | 0        | [18]       |
| Калия хлорид     | KCl                            | 230      | 0        | [12]       |
| Кальция фторид   | CaF <sub>2</sub>               | 475      | 0        | [12]       |
| Лития фторид     | LiF                            | 736      | 0        | [12]       |
| Магния оксид     | MgO                            | 800      | 0        | [12]       |
| Натрия хлорид    | NaCl                           | 275      | 0        | [12]       |
| Ниобия алюминид  | Nb <sub>3</sub> Al             | 280      | 32       | [35]       |
| Ниобия станид    | Nb <sub>3</sub> Sn             | 228      | 52       | [36]       |
| Рутил            | TiO <sub>2</sub>               | 778      | 0        | [37]       |
| Сапфир           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1042     | 0        | [38]       |
| Серебра бромид   | AgBr                           | 144      | 0        | [12]       |
| Серебра хлорид   | AgCl                           | 183      | 0        | [12]       |
| Хрома германид   | Cr <sub>3</sub> Ge             | 473—670  | 14—16    | [35]       |
| Хрома силицид    | Cr <sub>3</sub> Si             | 620—670  | 10—12    | [35]       |
| Цинка сульфид    | ZnS                            | 270      | 0        | [12]       |

Таблица 9.9. Молярная изобарная теплоемкость  $C_p$ , Дж/(моль · К), неорганических соединений при температуре 298,15 К [1]

Твердые тела и жидкости — при давлении 0,1013 МПа, газы — в состоянии идеального газа (г — газ, ж — жидкость)

| Вещество и состояние            | $C_p$ | Вещество и состояние                                        | $C_p$ |
|---------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------|-------|
| AgBr                            | 52,3  | AlF (г) [2]                                                 | 31,9  |
| AgBr (г)                        | 36,6  | AlN [2]                                                     | 30,1  |
| Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 112,5 | $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [2]                | 79,0  |
| AgCl [4]                        | 50,8  | $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [2]                | 82,7  |
| AgCl (г) [33]                   | 35,8  | $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O | 105,5 |
| AgClO <sub>2</sub>              | 87,3  | $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O | 131,2 |
| AgH (г)                         | 29,3  | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> [2]         | 259,4 |
| $\gamma$ -AgI                   | 57,0  | Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>                            | 136,4 |
| AgIO <sub>3</sub>               | 102,9 | AsCl <sub>3</sub> (ж)                                       | 133,5 |
| AgMg                            | 50,2  | AsF <sub>3</sub> (ж)                                        | 126,6 |
| AgNO <sub>2</sub>               | 79,1  | AsF <sub>3</sub> (г)                                        | 64,6  |
| AgNO <sub>3</sub>               | 102,9 | AsH <sub>3</sub> (г)                                        | 38,6  |
| Ag <sub>2</sub> O               | 65,9  | AsN (г)                                                     | 30,5  |
| Ag <sub>2</sub> S               | 76,5  | As <sub>4</sub> O <sub>6</sub>                              | 203,8 |
| Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 131,4 | As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                              | 116,5 |
| Ag <sub>2</sub> Se              | 81,8  | AuSb <sub>2</sub>                                           | 79,5  |
| Ag <sub>2</sub> Te              | 88,7  | AuSn                                                        | 50,5  |
| AlBr (г) [2]                    | 35,6  | BBr (г) [2]                                                 | 32,8  |
| AlBr <sub>3</sub>               | 100,5 | BBr <sub>3</sub> (г) [2]                                    | 67,8  |
| Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>  | 116,8 | B <sub>4</sub> C [2]                                        | 53,1  |
| AlCl (г) [2]                    | 34,7  | BCl (г) [2]                                                 | 31,7  |

| Вещество<br>и состояние                   | $C_p$ | Вещество<br>и состояние        | $C_p$ | Вещество<br>и состояние                              | $C_p$ | Вещество<br>и состояние                        | $C_p$ |
|-------------------------------------------|-------|--------------------------------|-------|------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------|-------|
| $\text{BCl}_3$ (r) [2]                    | 62,6  | $\text{CdI}_2$                 | 78,7  | $\text{GeF}_4$ (r) [2]                               | 82,0  | $\text{KMnO}_4$                                | 119,2 |
| $\text{BF}_3$ (r) [2]                     | 29,6  | $\text{CdMg}$                  | 51,6  | $\text{GeH}_4$ (r) [2]                               | 45,0  | $\text{KNO}_3$ [2]                             | 95,1  |
| $\text{BF}_3$ (r) [2]                     | 50,5  | $\text{CdO}$                   | 43,6  | $\text{GeHCl}_3$ (r) [2]                             | 54,8  | $\text{K}_2\text{O}$ [2]                       | 72    |
| $\text{BH}_3$ (r) [2]                     | 29,2  | $\text{CdS}$                   | 47,3  | $\text{GeI}_4$ (r) [2]                               | 104,2 | $\text{KOH}$ [2]                               | 64,9  |
| $\text{B}_2\text{H}_6$ (r) [2]            | 57,6  | $\alpha\text{-CdSO}_4$         | 99,6  | $\text{GeO}_2$ [2]                                   | 52,1  | $\text{KReO}_4$                                | 122,6 |
| $\text{B}_{10}\text{H}_{14}$              | 217,9 | $\text{CdSb}$                  | 45,7  | $\text{H}_3\text{BO}_3$ [2]                          | 81,3  | $\text{K}_2\text{SO}_4$ [2]                    | 131,5 |
| $\text{BN}$ [2]                           | 19,7  | $\text{CdSiO}_3$               | 88,6  | $\text{HBr}$ (r) [2]                                 | 29,1  | $\text{La}_2\text{O}_3$ [2]                    | 108,8 |
| $\text{BN}$ (r) [2]                       | 29,6  | $\text{CeN}$                   | 46,4  | $\text{HCN}$ (ж)                                     | 70,6  | $\text{LiAlO}_2$                               | 67,8  |
| $\text{BO}$ (r)                           | 29,2  | $\text{CeO}_2$                 | 61,6  | $\text{HCN}$ (r) [2]                                 | 35,9  | $\text{LiBr}$ [2]                              | 49,8  |
| $\text{B}_2\text{O}_2$ (r) [2]            | 60,3  | $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$   | 270,3 | $\text{HCl}$ (r) [2]                                 | 29,1  | $\text{LiBr}$ (r) [2]                          | 33,9  |
| $\text{B}_2\text{O}_3$ [2]                | 62,8  | $\text{Cl}_2\text{CO}$ (r) [2] | 57,8  | $\text{HD}$ (r) [2]                                  | 37,5  | $\text{Li}_2\text{CO}_3$                       | 98,3  |
| $\text{B}(\text{OH})_3$                   | 81,3  | $\text{ClF}$ (r) [2]           | 32,1  | $\text{HF}$ (r) [2]                                  | 30,2  | $\text{LiCl}$ [2]                              | 48,0  |
| $\text{BACO}_3$ [2]                       | 86,0  | $\text{ClF}_3$ (r) [2]         | 64,1  | $\text{HI}$ (r) [2]                                  | 28,8  | $\text{LiCl}$ (r) [2]                          | 33,2  |
| $\text{BACl}_2$ [2]                       | 75,1  | $\text{Cl}_2\text{O}$ (r) [2]  | 47,8  | $\text{HN}_3$ (r) [2]                                | 43,2  | $\text{LiD}$                                   | 34,6  |
| $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 203,3 | $\text{ClO}_2$ (r) [2]         | 42    | $\text{HNO}_2$ (r) [33]                              | 45,8  | $\text{LiF}$ [2]                               | 41,8  |
| $\text{BaF}_2$ [2]                        | 71,1  | $\text{CoCl}_2$                | 78,5  | $\text{HNO}_3$ (ж)                                   | 109,9 | $\text{LiF}$ (r) [2]                           | 31,3  |
| $\text{BaH}$ (r)                          | 30,2  | $\text{CoF}_2$                 | 68,8  | $\text{HNO}_3$ (r)                                   | 54,2  | $\text{LiFeO}_2$                               | 82,8  |
| $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$                | 151,6 | $\text{CoO}$                   | 55,2  | $\text{HNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$              | 182,4 | $\text{LiH}$ [2]                               | 29,0  |
| $\text{BaO}$ [2]                          | 47,0  | $\text{Co}_3\text{O}_4$        | 122,8 | $\text{H}_2\text{O}$ (ж) [2]                         | 75,3  | $\text{LiH}$ (r) [2]                           | 29,7  |
| $\text{BaSO}_4$ [2]                       | 102,1 | $\beta\text{-CoSO}_4$          | 103,2 | $\text{H}_2\text{O}$ (r) [2]                         | 33,6  | $\text{LiI}$                                   | 51,0  |
| $\text{BaTiO}_3$                          | 102,5 | $\text{Cr}_3\text{C}_2$        | 85,4  | $\text{H}_2\text{O}_2$ (ж)                           | 89,3  | $\text{LiNO}_3$                                | 89,1  |
| $\text{BeH}$ (r) [2]                      | 29,2  | $\text{Cr}(\text{CO})_6$       | 240,1 | $\text{H}_2\text{O}_2$ (r)                           | 43,1  | $\text{Li}_2\text{O}$ [2]                      | 54,1  |
| $\text{Be}_3\text{N}_2$ [2]               | 64,8  | $\text{CrCl}_3$                | 91,8  | $\text{HOCl}$ (r)                                    | 37,1  | $\text{LiOH}$ [2]                              | 49,6  |
| $\text{BeO}$ [2]                          | 25,6  | $\text{CrF}_3$                 | 78,7  | $\text{H}_3\text{PO}_4$                              | 106,1 | $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$         | 79,5  |
| $\text{BeSO}_4$ [2]                       | 85,7  | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ [2]    | 128,1 | $\text{HS}$ (r) [2]                                  | 32,5  | $\text{LiT}$                                   | 37,0  |
| $\text{BiCl}_3$                           | 109   | $\text{CsBr}$ [2]              | 52,9  | $\text{H}_2\text{S}$ (r) [2]                         | 34,2  | $\text{Li}_2\text{TiO}_3$                      | 111   |
| $\text{Bi}_2\text{O}_3$                   | 113,8 | $\text{CsCl}$ [2]              | 52,5  | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (ж)                          | 138,9 | $\text{MgB}_2$                                 | 47,8  |
| $\text{Bi}_2\text{Ti}$                    | 73,6  | $\text{CsClO}_4$               | 108,4 | $\text{H}_2\text{SO}_4$ (r) [2]                      | 84,4  | $\text{MgB}_4$                                 | 70,3  |
| $\text{BrCl}$ (r) [2]                     | 35,0  | $\text{CsF}$ [2]               | 51,1  | $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ж) | 214,8 | $\text{MgCO}_3$ [2]                            | 76,1  |
| $\text{BrF}$ (r) [2]                      | 33,0  | $\text{CsH}$ [2]               | 40,6  | $\text{H}_2\text{Se}$ (r)                            | 34,7  | $\text{MgCl}_2$ [2]                            | 71,4  |
| $\text{BrF}_3$ (ж)                        | 124,5 | $\text{CsH}$ (r) [2]           | 31,6  | $\text{H}_2\text{Te}$ (r)                            | 35,6  | $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$       | 115,3 |
| $\text{BrF}_3$ (r) [2]                    | 67,4  | $\text{CsI}$ [2]               | 52,5  | $\text{HfCl}_4$                                      | 120,5 | $\text{MgCr}_2\text{O}_4$                      | 126,8 |
| $\text{BrF}_5$ (r) [2]                    | 101,3 | $\gamma\text{-CuBr}$           | 54,7  | $\text{HfO}_2$ [2]                                   | 60,3  | $\text{MgF}_2$ [2]                             | 61,6  |
| $\text{BrI}$ (r) [2]                      | 36,5  | $\alpha\text{-CuCl}$           | 48,5  | $\text{HgBr}_2$ (r)                                  | 76,1  | $\text{Mg}_3\text{N}_2$                        | 92,1  |
| $\text{CCl}_4$ (ж)                        | 131,7 | $\alpha\text{-CuCl}_2$         | 71,9  | $\text{HgCl}$ (r)                                    | 36,4  | $\text{MgO}$ (r) [2]                           | 32,1  |
| $\text{CCl}_4$ (r) [2]                    | 82,9  | $\alpha\text{-CuI}$            | 54,0  | $\text{HgCl}_2$ (r)                                  | 57,7  | $\text{MgO}$ [2]                               | 37,2  |
| $\text{CN}$ (r) [2]                       | 29,2  | $\text{Cu}_3\text{N}$          | 90,8  | $\text{HgI}_2$ (красн.)                              | 78,2  | $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [2]                   | 80,7  |
| $\text{C}_2\text{N}_2$ (r) [2]            | 57,1  | $\text{CuO}$                   | 42,3  | $\text{HgI}_2$ (r)                                   | 61,1  | $\text{MgSO}_4$ [2]                            | 96,4  |
| $\text{CO}$ (r) [2]                       | 29,1  | $\text{Cu}_2\text{O}$          | 63,6  | $\text{HgO}$                                         | 44,1  | $\text{MgSiO}_3$                               | 81,9  |
| $\text{CO}_2$ (r) [2]                     | 37,1  | $\text{CuS}$                   | 47,8  | $\text{HgS}$                                         | 44,2  | $\text{MgSiO}_4$                               | 118,7 |
| $\text{C}_3\text{O}_2$ (r) [2]            | 62,2  | $\text{Cu}_2\text{S}$          | 76,3  | $\text{Hg}_2\text{SO}_4$                             | 132,0 | $\text{MgTiO}_3$                               | 91,9  |
| $\text{COS}$ (r) [2]                      | 41,6  | $\alpha\text{-CuSO}_4$         | 98,9  | $\text{IBr}$ (r)                                     | 34,5  | $\text{MgZn}_2$                                | 74,1  |
| $\text{CP}$ (r) [2]                       | 29,9  | $\text{Cu}_2\text{Sb}$         | 76,6  | $\text{ICl}$                                         | 56,2  | $\alpha\text{-Mn}_2\text{C}$                   | 93,3  |
| $\text{CS}$ (r) [2]                       | 29,8  | $\text{D}_2\text{O}$ [2]       | 84,3  | $\text{ICl}$ (r)                                     | 35,6  | $\text{MnCO}_3$                                | 94,8  |
| $\text{CS}_2$ (ж)                         | 75,7  | $\text{D}_2\text{O}$ (r) [2]   | 34,4  | $\text{IF}$ (r)                                      | 33,5  | $\text{MnCl}_2$                                | 72,9  |
| $\text{CS}_2$ (r) [2]                     | 45,5  | $\text{F}_2\text{O}$ (r) [2]   | 43,5  | $\text{IrO}_2$                                       | 57,3  | $\text{MnF}_2$ (r)                             | 52,7  |
| $\text{CaC}_2$                            | 62,7  | $\text{Fe}_3\text{C}$          | 105,8 | $\text{KBH}_4$                                       | 96,2  | $\text{MnO}$                                   | 44,1  |
| $\text{CaCO}_3$ [2]                       | 83,5  | $\text{FeCO}_3$                | 83,3  | $\text{KBO}_2$                                       | 67,1  | $\beta\text{-MnO}_2$                           | 54,0  |
| $\text{CaCl}_2$ [2]                       | 72,8  | $\text{Fe}(\text{CO})_5$ (ж)   | 240,6 | $\text{KBr}$ [2]                                     | 52,5  | $\text{Mn}_2\text{O}_3$                        | 107,5 |
| $\text{CaF}_2$ [2]                        | 67,0  | $\text{FeCl}_2$                | 76,4  | $\text{KBr}$ (r) [2]                                 | 36,9  | $\text{Mn}_3\text{O}_4$                        | 139,3 |
| $\text{CaFe}_2\text{O}_4$                 | 153,6 | $\text{FeCl}_3$                | 94,9  | $\text{KBrO}_3$                                      | 104,9 | $\text{MnS}$                                   | 49,9  |
| $\alpha\text{-Ca}_3\text{N}_2$            | 114,6 | $\text{FeCo}_2\text{O}_4$      | 143,3 | $\text{KCl}$ [2]                                     | 51,3  | $\text{MnSO}_4$                                | 100,2 |
| $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$                | 149,4 | $\text{FeCr}_2\text{O}_4$      | 133,7 | $\text{KCl}$ (r) [2]                                 | 36,5  | $\text{MnSe}$                                  | 51,3  |
| $\text{CaO}$ [2]                          | 42,0  | $\text{FeF}_2$                 | 68,1  | $\text{KClO}_3$                                      | 100,3 | $\alpha\text{-MnSiO}_3$                        | 86,4  |
| $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [2]              | 82,5  | $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ | 122,6 | $\text{KClO}_4$                                      | 110,2 | $\text{MnTe}$                                  | 72,3  |
| $\text{Ca}(\text{PO}_3)_2$                | 145,1 | $\text{FeO}$                   | 49,9  | $\text{K}_2\text{CrO}_4$                             | 146,0 | $\text{Mo}(\text{CO})_6$                       | 242,2 |
| $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$       | 231,6 | $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ | 103,8 | $\text{KF}$ [2]                                      | 49,0  | $\text{MoO}_2$ [2]                             | 55,9  |
| $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$        | 236   | $\text{Fe}_3\text{O}_4$        | 150,8 | $\text{KH}$ [2]                                      | 37,9  | $\text{MoO}_3$ [2]                             | 75,1  |
| $\text{CaS}$ [2]                          | 47,4  | $\alpha\text{-FeS}$            | 50,5  | $\text{KH}$ (r) [2]                                  | 31,0  | $\alpha\text{-MoS}_2$                          | 63,6  |
| $\text{CaSO}_3$                           | 91,7  | $\text{FeS}_2$                 | 62,2  | $\text{KH}_2\text{AsO}_4$                            | 126,7 | $\text{MoSi}_2$                                | 64,8  |
| $\text{CaSO}_4$                           | 99,7  | $\text{FeSi}$                  | 48,5  | $\alpha\text{-KHF}_2$                                | 76,9  | $\text{Mo}_3\text{Si}$                         | 93,0  |
| $\alpha\text{-CaSiO}_3$                   | 85,2  | $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$      | 132,9 | $\text{KH}_2\text{PO}_4$                             | 116,6 | $\text{NF}_3$ (r) [2]                          | 53,5  |
| $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$           | 128,6 | $\text{FeTiO}_3$               | 99,5  | $\text{KI}$ [2]                                      | 52,8  | $\text{NH}_3$ (r) [2]                          | 35,6  |
| $\text{CaTiO}_3$                          | 97,6  | $\text{Ga}_2\text{O}_3$ [2]    | 92,1  | $\text{KI}$ (r) [2]                                  | 37,1  | $\text{NH}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ (ж) | 117,9 |
| $\text{CdCl}_2$                           | 76,6  | $\text{GeBr}_4$ (r) [2]        | 101,7 | $\gamma\text{-KIO}_3$                                | 106,0 | $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ж)     | 154,9 |

| Вещество<br>и состояние               | $C_p$ | Вещество<br>и состояние        | $C_p$ | Вещество<br>и состояние    | $C_p$ | Вещество<br>и состояние            | $C_p$ |
|---------------------------------------|-------|--------------------------------|-------|----------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| $N_2H_4$ [2]                          | 48,4  | $\gamma$ -NiS                  | 47,1  | $SbCl_3$ (г)               | 77,4  | $\delta$ -TiN                      | 37,1  |
| $NH_4Cl$                              | 84,1  | $NiSO_4$                       | 97,7  | $Sb_4O_6$ (куб.)           | 209   | TiO [2]                            | 39,9  |
| $NH_4F$ [2]                           | 65,3  | $NiTe_2$                       | 75,9  | $Sb_4O_6$ (ромб.)          | 224   | TiO <sub>2</sub> (рутил) [2]       | 55,1  |
| $(NH_4)_2H_2PO_4$                     | 142,2 | $NpO_2$                        | 66,2  | $Sc_2O_3$                  | 94,1  | TiO <sub>2</sub> (анатаз) [2]      | 55,3  |
| $(NH_4)HSO_4$                         | 135,5 | $PB_3$ (г)                     | 76,1  | $SeF_6$ (г)                | 110,4 | Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [2] | 95,8  |
| $(NH_4)NO_3$ [2]                      | 139,1 | $PCl_3$ (г)                    | 71,8  | $SeO$ (г)                  | 31,1  | Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> [2] | 150,8 |
| $(NH_4)_2SO_4$                        | 187,4 | $PCl_5$ (г) [2]                | 113,3 | $SiBr_4$ (г)               | 97    | TiS <sub>2</sub>                   | 67,9  |
| $(NH_4)VO_3$ [2]                      | 129,3 | $PF_3$ (г) [2]                 | 58,7  | $\alpha$ -SiC [2]          | 26,8  | TlBr                               | 52,5  |
| NO (г) [2]                            | 29,9  | $PH_3$ (г)                     | 37,1  | $\beta$ -SiC [2]           | 26,8  | TlCl [2]                           | 50,9  |
| NO <sub>2</sub> (г) [2]               | 37,2  | PN (г) [2]                     | 29,7  | $SiCl_4$ (ж)               | 145,2 | TlCl (г) [2]                       | 36,4  |
| N <sub>2</sub> O (г) [2]              | 38,6  | $P_3N_5$                       | 150,6 | $SiCl_4$ (г)               | 90,4  | TlF [2]                            | 53,4  |
| N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (г) [2] | 79,2  | $POCl_3$ (г) [2]               | 84,4  | $SiF_4$ (г)                | 73,6  | TlNO <sub>3</sub>                  | 99,6  |
| N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>         | 143,1 | $POCl_3$ (ж)                   | 138,8 | $SiH_4$ (г)                | 42,9  | UCl <sub>3</sub>                   | 102,9 |
| N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (г) [2] | 95,3  | $P_4O_{10}$                    | 215,6 | $SiO_2$ (кварц) [2]        | 44,6  | UCl <sub>4</sub>                   | 122,0 |
| NOCi (г)                              | 44,7  | $P_4O_{10}$ (г)                | 191   | $SiO_2$ (стекл.) [2]       | 44,0  | $\alpha$ -UF <sub>4</sub> [2]      | 116,0 |
| NO <sub>2</sub> Cl (г)                | 53,2  | $PbBr_2$ (ж)                   | 56,9  | $SnBr_4$ (г)               | 103,0 | UF <sub>6</sub> [2]                | 166,8 |
| NOF (г)                               | 41,3  | $PbCl_2$ [2]                   | 77,0  | $SnCl_2$ [2]               | 78,0  | UF <sub>6</sub> (г) [2]            | 129,5 |
| NS (г) [2]                            | 31,8  | $\alpha$ -PbF <sub>2</sub>     | 72,3  | $SnCl_2$ (г) [2]           | 54,6  | $\beta$ -UH <sub>3</sub>           | 49,3  |
| NaAlO <sub>2</sub>                    | 73,3  | PbO (жсл.) [2]                 | 45,8  | $\beta$ -SnNi <sub>3</sub> | 99,6  | UO <sub>2</sub> [2]                | 63,6  |
| NaBH <sub>4</sub>                     | 86,7  | PbO (красн.) [2]               | 46,4  | SnO [2]                    | 47,8  | UO <sub>3</sub> [2]                | 81,7  |
| NaBO <sub>2</sub> [2]                 | 65,9  | PbO (г) [2]                    | 32,5  | SnO (г) [2]                | 31,8  | U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> [2]  | 238   |
| NaBr [2]                              | 51,4  | $PbO_2$ [2]                    | 61,0  | $SnO_2$ [2]                | 53,2  | UOCl <sub>2</sub>                  | 95,1  |
| NaBr (г) [2]                          | 36,3  | $Pb_2O_3$ [2]                  | 107,7 | SnPt                       | 50,2  | UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> [2] | 103,2 |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> [2]   | 112,3 | $Pb_3O_4$ [2]                  | 146,7 | SnS [2]                    | 49,2  | $\alpha$ -V <sub>2</sub> C         | 55,9  |
| NaCl [2]                              | 50,5  | PbS [2]                        | 49,5  | Sn S (г) [2]               | 34,5  | VCl <sub>2</sub>                   | 72,2  |
| NaCl (г) [2]                          | 35,8  | $PbSO_4$                       | 103,2 | Sn S <sub>2</sub>          | 70,1  | VCl <sub>3</sub>                   | 93,2  |
| NaClO <sub>4</sub>                    | 110,4 | PtS                            | 43,4  | SrBr <sub>2</sub> [2]      | 76,5  | V <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [2]  | 101,0 |
| NaF [2]                               | 46,8  | PtSb <sub>2</sub>              | 68,6  | SrCl <sub>2</sub> [2]      | 75,6  | V <sub>2</sub> O <sub>4</sub> [2]  | 112,1 |
| NaH [2]                               | 36,4  | $PuO_2$ [2]                    | 66,2  | SrCO <sub>3</sub> [2]      | 82,4  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [2]  | 127,8 |
| NaH (г) [2]                           | 30,2  | $Pu_2O_3$ [2]                  | 117,0 | SrO [2]                    | 45,0  | V <sub>3</sub> Si                  | 90,8  |
| NaHCO <sub>3</sub>                    | 88,2  | RbBr [2]                       | 52,8  | SrO (г) [2]                | 33,1  | $\alpha$ -WC                       | 35,1  |
| NaI [2]                               | 52,1  | RbCl [2]                       | 52,3  | SrSO <sub>4</sub> [2]      | 102,0 | WO <sub>3</sub> [2]                | 79,7  |
| NaI (г) [2]                           | 36,6  | $PbClO_3$                      | 103,2 | SrTiO <sub>3</sub>         | 98,4  | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [2]  | 102,5 |
| NaNO <sub>3</sub> [2]                 | 93,0  | RbF [2]                        | 50,6  | TaC                        | 36,8  | ZnCO <sub>3</sub>                  | 80,1  |
| NaO <sub>2</sub> [2]                  | 72,1  | RbI [2]                        | 52,6  | TaN                        | 42,7  | ZnCl <sub>2</sub>                  | 71,3  |
| Na <sub>2</sub> O [2]                 | 69,1  | $Rb_2O$ [2]                    | 74,0  | TeF <sub>6</sub> (г)       | 117   | $\alpha$ -ZnF <sub>2</sub>         | 65,6  |
| Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> [2]    | 89,3  | RhO                            | 48,1  | TeO <sub>2</sub>           | 64    | ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>   | 138,0 |
| NaOH [2]                              | 59,5  | Rh <sub>2</sub> O              | 73,2  | ThF <sub>4</sub>           | 110,7 | ZnO                                | 40,2  |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>       | 120,1 | Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 103,8 | ThN                        | 45,2  | ZnS                                | 45,5  |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [2]   | 128,0 | SF <sub>6</sub> (г) [2]        | 97,0  | ThO <sub>2</sub> [2]       | 61,8  | $\alpha$ -ZnSO <sub>4</sub>        | 99,1  |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>      | 111,9 | SO (г) [2]                     | 30,2  | TiB <sub>2</sub>           | 45,6  | Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>   | 123,3 |
| Na <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub>      | 125,6 | SO <sub>2</sub> (г) [2]        | 39,8  | TiC                        | 34,3  | Zn <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>   | 137,3 |
| $\theta$ -NbN                         | 37,5  | SO <sub>3</sub> (г) [2]        | 50,6  | TiCl (г)                   | 37,2  | ZrCl <sub>4</sub>                  | 73,6  |
| NBO <sub>2</sub> [2]                  | 57,7  | SOCl <sub>2</sub> (ж)          | 120,5 | TiCl <sub>2</sub>          | 69,8  | ZrN                                | 40,4  |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [2]    | 132,0 | SOCl <sub>2</sub> (г)          | 66,7  | TiCl <sub>3</sub>          | 97,1  | Zr <sub>3</sub> N <sub>2</sub>     | 127,2 |
| Nb <sub>3</sub> Sn [39]               | 72,5  | SOF <sub>2</sub> (г)           | 57,1  | TiCl <sub>4</sub> (ж)      | 145,2 | ZrO <sub>2</sub> [2]               | 55,9  |
| NiCl <sub>2</sub>                     | 71,7  | SbCl <sub>3</sub>              | 110,5 |                            |       | ZrSiO <sub>4</sub>                 | 98,3  |
| NiF <sub>2</sub>                      | 64,1  |                                |       |                            |       |                                    |       |
| NiO                                   | 44,3  |                                |       |                            |       |                                    |       |



Таблица 9.10. Молярная изобарная теплоемкость  $c_p$ , Дж/(моль · К), неорганических соединений при температуре от 20 до 1500 К и давлении 0,1013 МПа [2, 4]

Теплоемкость газов дана в состоянии идеального газа, т. е. при предельно низком давлении. Изменение состояния вещества обозначено до и после фазового перехода: т — твердое, ж — жидкое, г — газообразное. Различные кристаллические модификации твердого состояния отмечены греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и др.

| Вещество                        | Температура, К |           |       |            |           |            |           |            |           |
|---------------------------------|----------------|-----------|-------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
|                                 | 20             | 40        | 80    | 150        | 250       | 400        | 600       | 1000       | 1500      |
| AgBr                            | —              | 28,28     | 42,59 | 48,87      | 51,88     | 58,95      | 71,84 (г) | 37,34 (г)  | 37,36     |
| AgCl                            | 8,71           | 22,30     | 37,95 | 46,94      | 50,41     | 58,86      | 61,63 (г) | 37,24 (г)  | 37,28     |
| AgI                             | 15,31          | 28,03     | 42,72 | 50,12      | 53,48     | 64,68 (г)  | —         | 37,36 (г)  | 37,38     |
| AgNO <sub>3</sub>               | 11,30          | 27,82     | 52,59 | 71,04      | 86,48     | 112,3      | —         | —          | —         |
| Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 12,72          | 38,49     | 73,81 | 99,16      | 123,5     | 144        | 167       | —          | —         |
| AlBr                            | —              | —         | —     | —          | —         | 36,40      | 37,11     | 37,62      | 37,98     |
| AlF <sub>3</sub>                | —              | —         | 17,20 | 42,76      | 67,40     | 86,28      | 97,31     | 100,83     | 105,86    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,076          | 0,691     | 6,89  | 31,98      | 67,01     | 96,19      | 112,85    | 124,53     | 132,42    |
| (корунд)                        | —              | —         | —     | —          | —         | —          | —         | —          | —         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,08           | 0,71      | 6,95  | 31,97      | 66,90     | —          | —         | —          | —         |
| (сапфир)                        | —              | —         | —     | —          | —         | —          | —         | —          | —         |
| AsF <sub>3</sub>                | 11,40          | 29,12     | 48,24 | 68,58 (г)  | —         | 71,9 (г)   | 77,2      | 82,9       | —         |
| AsH <sub>3</sub>                | 18,28          | 44,97     | 50,28 | 46,79      | 90,71 (г) | 45,4 (г)   | 53,1      | 63,8       | 75,7      |
| AuCl                            | —              | —         | —     | —          | —         | 36,28      | 36,90     | 37,20      | 37,28     |
| B <sub>4</sub> C                | —              | —         | 2,68  | 14,73      | 41,13     | 77,87      | 96,76     | 112,33     | 128,61    |
| BF <sub>3</sub>                 | 12,13          | 29,29     | 47,20 | 103,05 (г) | —         | 57,55 (г)  | 67,07     | 75,80      | 79,50     |
| B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>   | 5,02           | 21,30     | 44,18 | 75,44 (г)  | —         | 74,07 (г)  | 101,36    | 136,44     | 157,57    |
| BN                              | 0,272          | 1,08      | 3,88  | 8,77       | 16,33     | 27,00      | 35,23     | 44,31      | 48,58     |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 0,23           | 3,22      | 15,82 | 33,15      | 53,44     | 78,52      | 97,83 (г) | 130,18 (ж) | 128,44    |
| BaCO <sub>3</sub>               | —              | —         | 41,05 | 64,14      | 80,21     | 100,18     | 111,39    | 143,97     | —         |
| BaF <sub>2</sub>                | 2,51           | 12,47     | 35,19 | 58,49      | 60,64     | 75,07      | 81,67     | 93,92      | —         |
| BaO                             | —              | —         | 26,78 | 39,66      | 46,02     | 49,96      | 53,20     | 57,17      | 60,55     |
| BaSO <sub>4</sub>               | 5,48           | 21,76     | 49,25 | 72,38      | 93,97     | 118,76     | 137,01    | 161,69     | —         |
| BaTiO <sub>3</sub>              | —              | —         | 31,51 | 66,78      | 95,48     | 112,90     | 121,30    | 128,1      | 134,60    |
| BeO                             | —              | —         | 1,67  | 7,95       | 20,46     | 33,63      | 42,31     | 48,72      | 52,30     |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | —              | —         | 52,72 | 81,50      | 107,6     | 116,90     | 123,60    | —          | —         |
| BrF (г)                         | —              | —         | —     | —          | —         | 34,52      | 36,15     | 37,32      | 37,95     |
| BrF <sub>3</sub> (г)            | —              | —         | —     | —          | —         | 72,72      | 78,03     | 81,20      | —         |
| CO                              | 14,02          | 34,14 (г) | —     | —          | —         | 29,34 (г)  | 39,44     | 33,18      | 35,21     |
| CO <sub>2</sub> *               | 5,13           | 19,62     | 35,91 | 47,72 (г)  | —         | 41,33 (г)  | 47,33     | 54,32      | 58,40     |
| COS                             | 11,00          | 27,70     | 40,25 | 72,33 (г)  | —         | 45,85 (г)  | 51,16     | 56,77      | 59,86     |
| CS <sub>2</sub>                 | 11,97          | 27,82     | 41,09 | 55,64      | 75,27 (г) | 49,46 (г)  | 54,35     | 58,90      | 61,04     |
| CaCO <sub>3</sub>               | —              | —         | 31,80 | 55,56      | 75,23     | 96,98      | 109,86    | 124,53     | 139,30    |
| (кальцит)                       | —              | —         | —     | —          | —         | —          | —         | —          | —         |
| CaCl <sub>2</sub>               | —              | —         | 40,88 | 61,30      | 70,71     | 75,30      | 78,81     | 84,34      | —         |
| CaF <sub>2</sub>                | —              | —         | 20,0  | 46,19      | 62,93     | 74,86      | 78,35     | 91,25      | 125,40    |
| CaO                             | 0,08           | 1,26      | 9,71  | 27,15      | 41,46     | 46,98      | 50,72     | 53,36      | 55,10     |
| Ca(OH) <sub>2</sub>             | 0,92           | 5,69      | 22,84 | 53,56      | 79,37     | 96,04      | 106,26    | 121,34     | —         |
| CaSO <sub>4</sub>               | —              | —         | 36,90 | 65,44      | 90,92     | 117,02     | 135,38    | 159,27     | —         |
| CaTiO <sub>3</sub>              | —              | —         | 26,07 | 59,71      | 89,16     | 112,70     | 123,1     | 130,3      | 134,80    |
| CdCl <sub>2</sub>               | 7,49           | 19,75     | 43,18 | 63,43      | 72,30     | 77,32      | 85,35     | —          | —         |
| ClF <sub>3</sub>                | 8,79           | 25,31     | 44,89 | 66,32      | 114,6 (г) | 71,34 (г)  | 77,19     | 80,83      | 82,13     |
| Cl <sub>2</sub> O (г)           | —              | —         | —     | —          | —         | 49,00      | 53,1      | 56,1       | 57,30     |
| ClO <sub>2</sub> (г)            | —              | —         | —     | —          | —         | 45,86      | 51,13     | 55,61      | 57,49     |
| CoF <sub>2</sub>                | 3,28           | 9,43      | 25,78 | 48,03      | 64,06     | —          | —         | —          | —         |
| Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>  | 0,84           | 3,43      | 20,92 | 56,40      | 88,35     | 113,1      | 127,90    | 147,3      | —         |
| CrF <sub>3</sub>                | 3,75           | 15,29     | 29,79 | 51,84      | 72,68     | —          | —         | —          | —         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | —              | —         | 15,02 | 51,04      | 96,9      | 112,4      | 122,00    | 127,4      | 133,2     |
| CuBr                            | —              | 19,50     | 36,11 | 46,78      | 52,79 (г) | 36,63 (г)  | 37,04     | 37,24      | 37,31     |
| CuO                             | 0,59           | 3,51      | 12,38 | 26,12      | 39,11     | 46,82      | 50,84     | 58,87      | —         |
| Cu <sub>2</sub> O               | —              | 18,95     | 35,65 | 47,53      | 54,90     | 71,88      | 76,65     | 86,19      | —         |
| Cu <sub>2</sub> S               | —              | —         | 42,93 | 61,92      | 73,55 (α) | 97,28 (β)  | 97,28     | —          | —         |
| F <sub>2</sub> O (г)            | —              | —         | —     | —          | —         | 47,61      | 52,43     | 55,86      | 57,11     |
| Fe <sub>3</sub> C               | —              | —         | 32,30 | 66,61      | 101,5     | 115,60 (α) | 114,7 (β) | 119,70     | 126,0     |
| FeCl <sub>2</sub>               | —              | —         | 42,17 | 64,10      | 74,43     | 79,66      | 83,09     | —          | —         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,38           | 3,99      | 21,20 | 56,27      | 92,22     | 129,1      | 140,8 (α) | 150,6 (β)  | 143,7 (γ) |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>  | —              | —         | 37,45 | 92,76      | 131,8     | 172,2      | 212,5 (α) | 200,8 (β)  | 200,8     |
| FeS                             | 1,1            | 6,99      | 20,9  | 36,12      | 47,11     | 65,9 (α)   | 57,02 (γ) | 61,00      | —         |
| Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,46           | 5,56      | 23,47 | 53,30      | 81,92     | 105,53     | 116,78    | 126,98     | 135,78    |

| Вещество                                       | Температура, К |       |           |           |            |           |           |        |        |
|------------------------------------------------|----------------|-------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|--------|--------|
|                                                | 20             | 40    | 80        | 150       | 250        | 400       | 600       | 1000   | 1500   |
| GeF <sub>4</sub>                               | —              | —     | —         | —         | —          | 90,03     | 98,61     | 104,34 | 106,37 |
| HBr                                            | 11,05          | 20,50 | 39,33     | 46,88 (τ) | —          | 29,21 (r) | 29,87     | 32,33  | 34,74  |
| HCN                                            | 3,49           | 12,48 | 28,52     | 42,32     | 60,84 (τ)  | 39,42 (r) | 44,19     | 50,79  | 56,40  |
| HCl                                            | 5,86           | 15,69 | 27,99 (τ) | —         | —          | 29,16 (r) | 29,71     | 31,76  | —      |
| HF                                             | 2,51           | 9,04  | 16,95     | 25,57 (τ) | —          | 29,19 (r) | 29,23     | 30,17  | 32,33  |
| HI                                             | 14,14          | 23,26 | 37,40     | 45,58 (τ) | —          | 29,29 (r) | 30,12     | 32,34  | 35,27  |
| HNO <sub>3</sub>                               | 5,18           | 18,69 | 36,92     | 51,76     | 111,5 (τ)  | 63,40 (r) | —         | —      | —      |
| H <sub>2</sub> O*1                             | 1,98           | 6,12  | 12,82     | 21,95     | 34,71 (τ)  | 34,16 (r) | 36,29     | 41,54  | —      |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                  | 1,23           | 6,90  | 20,48     | 35,31     | 51,46 (τ)  | 46,48 (r) | 53,52     | 62,62  | —      |
| H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                 | 4,23           | 16,4  | 35,5      | 60,2      | 91,3       | —         | —         | —      | —      |
| H <sub>2</sub> S                               | 5,23           | 14,90 | 30,59     | 56,32 (τ) | —          | 35,66     | 39,05     | 45,97  | 51,78  |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                 | 7,24           | 21,84 | 39,37     | 59,79     | 88,58      | —         | —         | —      | —      |
| H <sub>2</sub> Se                              | —              | —     | 37,7      | 54,85 (τ) | —          | 36,28     | 40,21     | 47,24  | —      |
| HiO <sub>2</sub>                               | —              | —     | —         | —         | —          | 66,97     | 73,13     | 79,73  | 86,13  |
| HgCl                                           | 8,03           | 29,00 | 37,53     | 44,64     | 49,45 (τ)  | 36,74 (ж) | 37,11     | 37,28  | 37,36  |
| HgO                                            | 5,44           | 15,02 | 25,32     | 31,40     | 41,45      | —         | —         | —      | —      |
| (красная)                                      | —              | —     | —         | —         | —          | —         | —         | —      | —      |
| IBr (r)                                        | —              | —     | —         | —         | —          | 36,99     | 37,40     | 37,78  | 38,07  |
| ICl (r)                                        | —              | —     | —         | —         | —          | 36,40     | 37,11     | 37,66  | 37,99  |
| KBr                                            | 6,94           | 23,18 | 39,92     | 47,94     | 50,88      | 53,32     | 56,64     | 64,62  | —      |
| KCl                                            | 2,84           | 15,64 | 34,48     | 45,18     | 49,88      | 52,98     | 55,89     | 64,03  | —      |
| KF                                             | 1,16           | 7,92  | 25,48     | 40,71     | 47,70      | 51,72     | 55,29     | 60,99  | —      |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                | 3,21           | 17,67 | 46,36     | 75,06     | 104,0      | —         | —         | —      | —      |
| KMnO <sub>4</sub>                              | 12,89          | 35,23 | 61,92     | 87,86     | 110,6      | —         | —         | —      | —      |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                 | —              | —     | 68,24     | 96,86     | 120,5      | 146,84    | 174,46    | —      | —      |
| Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                | 0,96           | 6,74  | 26,07     | 55,56     | 85,77      | —         | —         | —      | —      |
| LiF                                            | 0,08           | 0,75  | 7,78      | 24,85     | 38,07      | 46,38     | 51,57     | 59,18  | —      |
| Li <sub>2</sub> O                              | 0,063          | 0,54  | 5,61      | 24,45     | 46,93      | 63,98     | 73,23     | 88,73  | 117,4  |
| MgCO <sub>3</sub>                              | —              | —     | 15,82     | 43,85     | 68,62      | 89,87     | 107,70    | 135,88 | —      |
| MgCl <sub>2</sub>                              | —              | —     | 31,34     | 55,44     | 68,16      | 75,62     | 79,85     | —      | —      |
| MF <sub>2</sub>                                | —              | —     | 14,77     | 37,66     | 56,48      | 69,75     | 75,94     | 80,31  | 83,20  |
| MgO                                            | 0,088          | 0,53  | 4,54      | 18,73     | 33,30      | 42,77     | 47,30     | 50,87  | 53,34  |
| Mg(OH) <sub>2</sub>                            | 0,34           | 2,83  | 13,74     | 40,96     | 68,78      | 81,00     | 94,22     | —      | —      |
| α-Mn <sub>2</sub> C                            | —              | —     | 31,38     | 62,84     | 86,61      | 104,4     | 115,0     | 127,4  | —      |
| MnCl <sub>2</sub>                              | —              | —     | 38,50     | 60,58     | 70,71      | 77,15     | 81,84     | —      | —      |
| MnF <sub>2</sub>                               | 4,97           | 17,02 | 29,6      | 49,1      | 64,1       | —         | —         | —      | —      |
| MnO                                            | —              | —     | 21,80     | 33,14     | 41,51      | 47,45     | 50,33     | 54,14  | 58,49  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | —              | —     | 41,84     | 61,84     | 93,72      | 109,0     | 120,8     | 137,2  | —      |
| MnS                                            | —              | —     | 33,14     | 49,16     | 48,95      | 50,71     | 52,22     | 55,23  | 58,99  |
| MoO <sub>3</sub>                               | 1,63           | 6,99  | 23,77     | 47,70     | 67,99      | 82,56     | 92,27     | 107,63 | —      |
| Mo <sub>2</sub> Si                             | —              | —     | 34,12     | 69,02     | 88,57      | 97,02     | 102,3     | 110,7  | 120,5  |
| NH <sub>3</sub> *1                             | 1,54           | 7,61  | 20,77     | 38,65 (τ) | —          | 38,67     | 45,23     | 56,24  | 65,94  |
| N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>                  | 1,46           | 8,91  | 24,96     | 42,03     | 59,75 (τ)  | 63,2 (r)  | 76,5      | 93,3   | 107    |
| NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 4,18           | 17,77 | 46,53     | 131,80    | 125,20     | —         | —         | —      | —      |
| NH <sub>4</sub> O <sub>3</sub>                 | 4,21           | 20,07 | 48,74     | 82,92     | 128,13     | —         | —         | —      | —      |
| NO                                             | 7,03           | 17,28 | 30,21 (τ) | —         | —          | 29,95 (r) | 31,24     | 33,99  | 35,79  |
| N <sub>2</sub> O                               | 6,32           | 21,46 | 37,45     | 51,06 (τ) | —          | 42,87 (r) | 48,86     | 56,02  | 60,45  |
| N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                  | 8,49           | 28,70 | 52,55     | 76,82     | 107,20 (τ) | 90,46 (r) | 105,45    | 118,6  | 124,0  |
| N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (r)              | —              | —     | —         | —         | —          | 106,8     | 121,9     | 136,4  | 143,0  |
| NaBH <sub>4</sub>                              | 1,59           | 10,54 | 31,71     | 57,86     | 80,00      | 94,56     | 108,6     | —      | —      |
| NaCl                                           | 1,42           | 10,04 | 29,37     | 44,10     | 48,86      | 51,92     | 55,53     | 65,52  | —      |
| NaF                                            | —              | —     | 16,15     | 34,23     | 44,43      | 51,03     | 54,58     | 61,35  | —      |
| NaNO <sub>3</sub>                              | 3,77           | 17,32 | 43,56     | 66,02     | 84,22      | 113       | —         | —      | —      |
| Na <sub>2</sub> O                              | —              | —     | —         | —         | —          | 73,93     | 80,64     | 91,85  | —      |
| NaOH                                           | —              | —     | 20,67     | 41,30     | 55,44      | 66,64     | 86,04     | 84,57  | 84,56  |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                | 2,43           | 17,06 | 53,39     | 89,70     | 117,6      | 145,3     | 176,88    | 209,0  | —      |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>               | —              | —     | 36,15     | 73,26     | 102,2      | 130,6     | 148,0     | 168,9  | —      |
| Na <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub>               | —              | —     | 34,64     | 78,16     | 114,4      | 140 (α)   | 151,3 (β) | 179,7  | —      |
| Nb <sub>3</sub> Al [39]                        | 3,08           | 17,44 | 47,84     | 76,24     | 91,32      | 100,1     | —         | —      | —      |
| Nb <sub>3</sub> Sn [39]                        | 5,04           | 22,84 | 56,28     | 81,60     | 93,80      | 99,80     | —         | —      | —      |
| NiCl <sub>2</sub>                              | 3,29           | 13,08 | 35,19     | 57,66     | 69,04      | 75,40     | 79,79     | 85,94  | —      |
| NiO                                            | —              | —     | 9,25      | 24,89     | 39,41      | 52,13 (α) | 51,84 (γ) | 55,23  | 59,45  |
| PH <sub>3</sub>                                | 10,29          | 40,88 | 50,46     | 60,51 (τ) | —          | 41,80 (r) | 50,92     | 64,31  | 72,84  |

| Вещество                                  | Температура, К |       |       |           |            |            |           |           |        |
|-------------------------------------------|----------------|-------|-------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|--------|
|                                           | 20             | 40    | 80    | 150       | 250        | 400        | 600       | 1000      | 1500   |
| PbCl <sub>2</sub>                         | 12,55          | 33,64 | 55,40 | 67,95     | 74,98      | 80,72      | 85,73     | —         | —      |
| PbO<br>(красная)                          | —              | —     | 22,94 | 34,70     | 43,45      | 48,73      | 52,92     | —         | —      |
| PbO<br>(желтая)                           | —              | —     | 23,82 | 35,20     | 43,57      | —          | —         | 57,95     | —      |
| RbI                                       | 15,06          | 34,73 | 46,02 | 50,38     | 52,30      | 53,5       | 57,35     | —         | —      |
| SF <sub>6</sub>                           | 22,64          | 42,93 | 60,63 | 75,13 (т) | —          | 117,9 (г)  | 133,5     | 147,2     | 158,1  |
| SO <sub>2</sub>                           | 6,95           | 24,18 | 43,18 | 57,53     | 86,65 (т)  | 43,47 (г)  | 48,99     | 54,52     | 57,11  |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>            | —              | —     | 37,99 | 72,26     | 106,9 (т)  | 121,7 (ж)  | 135,2     | 162,3     | —      |
| SeF <sub>6</sub> (г)                      | —              | —     | —     | —         | —          | 127,9      | 141,3     | 150,7     | 156,6  |
| SiC                                       | —              | —     | 2,38  | 10,00     | 22,07      | 34,19      | 41,24     | 47,72     | 51,26  |
| SiH <sub>4</sub>                          | 9,41           | 26,19 | 51,46 | 61,35 (т) | —          | 51,42 (г)  | 65,84     | 84,49     | 95,46  |
| SiO <sub>2</sub><br>(кварц)<br>[2, 4, 33] | 1,00           | 3,93  | 11,92 | 24,94     | 39,33      | 53,42      | 64,52     | 68,94     | 74,00  |
| SiO <sub>2</sub><br>(кристобалит)<br>[33] | —              | —     | 12,05 | 25,02     | 39,29      | 53,14      | 65,35     | 72,97     | 73,05  |
| SiO <sub>2</sub><br>(тридимит)<br>[33]    | —              | —     | 12,47 | 25,52     | 39,79      | 61,50      | 63,68     | 68,12     | 73,64  |
| SnO <sub>2</sub>                          | —              | —     | 15,48 | 32,89     | 49,08      | 65,09      | 74,28     | 81,18     | 86,10  |
| SnS                                       | —              | —     | 29,29 | 41,76     | 47,82      | 51,00      | 56,08 (т) | 56,57 (ж) | 74,90  |
| SrCO <sub>3</sub>                         | —              | —     | 34,77 | 59,77     | 75,65      | 97,09      | 106,29    | 125,75    | —      |
| SrO                                       | —              | —     | 18,20 | 34,31     | 43,26      | 48,45      | 52,04     | 56,31     | 60,14  |
| SrSO <sub>4</sub>                         | 2,88           | 16,31 | 43,91 | 69,81     | 92,99      | 117,94     | 135,91    | 161,00    | —      |
| TaC                                       | —              | —     | 15,65 | 24,18     | 33,43      | —          | —         | —         | —      |
| ThO <sub>2</sub>                          | —              | —     | —     | —         | —          | 67,69      | 72,74     | 77,61     | 82,29  |
| TiC                                       | —              | —     | 4,23  | 15,73     | 29,37      | 41,46      | 47,32     | 51,34     | 53,85  |
| TiCl <sub>4</sub> (г)                     | —              | —     | 25,02 | 49,12     | 64,10      | 100,8      | 104,3     | 106,5     | 107,6  |
| TiO                                       | —              | —     | 8,54  | 22,89     | 36,07      | 46,58      | 50,73     | 57,76     | —      |
| Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | —              | —     | 17,03 | 51,46     | 87,45      | 119,24     | 136,38    | 143,47    | 158,02 |
| UCl <sub>3</sub> [33]                     | —              | —     | —     | —         | —          | 97,15      | 105,1     | 115,2     | 118,4  |
| UF <sub>4</sub>                           | 5,13           | 20,49 | 53,14 | 89,39     | 111,90     | 121,75     | 125,80    | 133,38    | —      |
| UF <sub>6</sub>                           | 17,0           | 40,31 | 80,32 | 118,3     | 152,40 (т) | 139,80 (г) | 148,98    | 154,54    | 156,42 |
| UO <sub>2</sub>                           | 4,19           | 11,03 | 23,28 | 42,13     | 59,25      | 73,43      | 79,13     | 82,70     | 90,97  |
| VC                                        | —              | —     | 6,99  | 18,37     | 29,71      | 43,51      | 48,49     | 53,64     | 58,53  |
| V <sub>3</sub> Ga [40]                    | —              | —     | 43,7  | 72,4      | 89,8       | 109,6      | —         | —         | —      |
| V <sub>3</sub> Ge [41]                    | 1,62           | 9,44  | 40,0  | 74,16     | 90,52      | —          | —         | —         | —      |
| V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | —              | —     | 18,20 | 60,54     | 95,48      | 117,05     | 127,46    | 133,09    | 139,29 |
| V <sub>3</sub> Si [41]                    | 1,72           | 7,6   | 32,9  | 66,3      | 85,9       | —          | —         | —         | —      |
| WC [33]                                   | —              | —     | —     | —         | —          | 37,03      | 38,83     | 42,47     | 47,03  |
| WO <sub>3</sub> [4, 33]                   | —              | —     | 24,43 | 49,92     | 73,39      | 83,62      | —         | —         | —      |
| ZnF <sub>2</sub>                          | 0,98           | 6,95  | 23,86 | 46,44     | 61,76      | —          | —         | —         | —      |
| ZnO                                       | —              | —     | —     | 25,86     | 37,03      | 45,33      | 49,50     | 53,18     | 56,23  |
| ZnS                                       | 1,67           | 8,20  | 19,83 | 34,43     | 43,26      | 49,41      | 52,38     | 55,48     | —      |
| ZrN                                       | —              | —     | 15,82 | 24,69     | 36,78      | 44,77      | 48,66     | 52,76     | —      |
| ZrO <sub>2</sub>                          | —              | —     | 13,05 | 32,30     | 50,58      | 63,56      | 70,04     | 76,07     | 78,1   |

\*1 См. также табл. 9.11.

Таблица 9.11. Зависимость удельной изобарной теплоемкости  $c_p$ , кДж/(кг · К), аммиака, воды, водяного пара и углекислого газа от давления и температуры

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе, ниже — к газообразной

| T, К                        | Давление, МПа |             |      |      | T, К | Давление, МПа |      |      |      |
|-----------------------------|---------------|-------------|------|------|------|---------------|------|------|------|
|                             | 0,1           | 1           | 10   | 50   |      | 0,1           | 1    | 10   | 50   |
| Аммиак NH <sub>3</sub> [42] |               |             |      |      |      |               |      |      |      |
| 200                         | 4,42          | 4,42        | 4,40 | 4,32 | 400  | 2,29          | 2,45 | 22,3 | 4,71 |
| 230                         | 4,46          | 4,46        | 4,43 | 4,33 | 500  | 2,47          | 2,53 | 3,41 | 6,14 |
| 250                         | <u>2,18</u>   | 4,51        | 4,47 | 4,34 | 600  | 2,66          | 2,69 | 3,05 | 4,78 |
| 300                         | 2,15          | <u>2,94</u> | 4,64 | 4,35 | 750  | 2,92          | 2,94 | 3,08 | 3,70 |

| T, К | t, °C | Давление, МПа |   |   |   |    |    |    |     |
|------|-------|---------------|---|---|---|----|----|----|-----|
|      |       | 0,1           | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |

*Вода и водяной пар H<sub>2</sub>O [43]*

|         |     |              |              |              |              |              |              |       |       |
|---------|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|
| 273,15  | 0   | 4,217        | 4,212        | 4,207        | 4,196        | 4,165        | 4,117        | 3,993 | 3,890 |
| 323,15  | 50  | 4,181        | 4,179        | 4,176        | 4,170        | 4,158        | 4,137        | 4,080 | 4,038 |
| 373,15  | 100 | <u>2,038</u> | 4,213        | 4,211        | 4,205        | 4,194        | 4,173        | 4,117 | 4,071 |
| 423,15  | 150 | 1,979        | 4,308        | 4,305        | 4,296        | 4,281        | 4,252        | 4,178 | 4,121 |
| 473,15  | 200 | 1,974        | <u>2,433</u> | 4,494        | 4,477        | 4,450        | 4,402        | 4,284 | 4,200 |
| 523,15  | 250 | 1,988        | 2,212        | <u>2,580</u> | 4,854        | 4,791        | 4,684        | 4,463 | 4,328 |
| 573,15  | 300 | 2,011        | 2,141        | 2,321        | <u>3,199</u> | <u>5,70</u>  | 5,33         | 5,788 | 4,538 |
| 623,15  | 350 | 2,038        | 2,125        | 2,235        | 2,670        | <u>4,043</u> | 8,10         | 5,45  | 4,897 |
| 633,15  | 360 | 2,044        | 2,127        | 2,231        | 2,625        | 3,769        | <u>11,37</u> | 5,64  | 4,984 |
| 643,15  | 370 | 2,050        | 2,128        | 2,222        | 2,578        | 3,546        | <u>18,38</u> | 5,84  | 5,06  |
| 653,15  | 380 | 2,056        | 2,127        | 2,212        | 2,528        | 3,356        | 10,19        | 6,10  | 5,18  |
| 663,15  | 390 | 2,061        | 2,125        | 2,202        | 2,486        | 3,201        | 7,65         | 6,43  | 5,29  |
| 673,15  | 400 | 2,068        | 2,126        | 2,197        | 2,451        | 3,078        | 6,33         | 6,81  | 5,39  |
| 723,15  | 450 | 2,099        | 2,141        | 2,191        | 2,360        | 2,726        | 3,959        | 9,48  | 5,94  |
| 773,15  | 500 | 2,132        | 2,164        | 2,201        | 2,324        | 2,569        | 3,257        | 7,20  | 6,42  |
| 873,15  | 600 | 2,200        | 2,219        | 2,240        | 2,311        | 2,445        | 2,770        | 4,082 | 5,01  |
| 973,15  | 700 | 2,270        | 2,283        | 2,299        | 2,346        | 2,429        | 2,613        | 3,279 | 3,881 |
| 1073,15 | 800 | 2,341        | 2,352        | 2,364        | 2,401        | 2,465        | 2,598        | 3,024 | 3,415 |

| T, К | Давление, МПа |   |    |     | T, К | Давление, МПа |   |    |     |
|------|---------------|---|----|-----|------|---------------|---|----|-----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |

*Углекислый газ CO<sub>2</sub> [44, 45]*

|     |              |              |       |       |      |       |       |       |       |
|-----|--------------|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 220 | <u>0,786</u> | 1,820        | 1,745 | —     | 350  | 0,900 | 0,936 | 1,930 | 1,561 |
| 240 | 0,798        | <u>1,018</u> | 1,864 | 1,466 | 400  | 0,941 | 0,966 | 1,327 | 1,530 |
| 260 | 0,814        | 0,945        | 2,039 | 1,609 | 600  | 1,077 | 1,084 | 1,161 | 1,422 |
| 280 | 0,832        | 0,920        | 2,273 | 1,648 | 1000 | 1,234 | 1,236 | 1,254 | —     |
| 300 | 0,852        | 0,916        | 2,977 | 1,630 | 1500 | 1,327 | 1,328 | 1,334 | —     |

# 9.4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Продолжение табл. 9.12

В табл. 9.12 — 9.14 приведены значения теплоемкости различных органических соединений.

Таблица 9.12. Молярная изобарная теплоемкость  $C_p$ , Дж/(моль · К) органических соединений при температуре 298,15 К [4]

Жидкости и твердые тела — при давлении 0,1013 МПа, газы — в состоянии идеального газа (т. е. при предельно низком давлении): г — газ; ж — жидкость; тв — твердый

| Вещество, формула, состояние            | $C_p$ |
|-----------------------------------------|-------|
| Азулен $C_{10}H_8$ (г)                  | 128,4 |
| Анилин $C_6H_7$ (ж)                     | 191   |
| Ацетальдегид $C_2H_4O$ (г)              | 56,6  |
| Ацетон $C_3H_6O$ (ж)                    | 125   |
| Ацетон $C_3H_6O$ (г)                    | 74,9  |
| Бензол $C_6H_6$ (ж)                     | 136,1 |
| Бензол $C_6H_6$ (г)                     | 81,7  |
| Бромбензол $C_6H_5Br$ (ж)               | 155,4 |
| Бромметан $CH_3Br$ (г) [2]              | 42,4  |
| 1,3-Бутадиен $C_4H_6$ (г)               | 79,5  |
| Бутан $C_4H_{10}$ (г)                   | 98,7  |
| 1-Бутанол $C_4H_{10}O$ (ж)              | 179   |
| 1-Бутен, $C_4H_8$ (г)                   | 89,3  |
| Бутилбензол $C_{10}H_{14}$ (ж) [21]     | 175   |
| 1-Бутин $C_4H_6$ (г)                    | 81,4  |
| 2-Бутин $C_4H_6$ (ж)                    | 125,1 |
| 2-Бутин $C_4H_6$ (г)                    | 78,0  |
| Гексан $C_6H_{14}$ (ж)                  | 195   |
| Гексан (г) $C_6H_{14}$ (г)              | 146,7 |
| Гексанол $C_6H_{14}O$ (ж)               | 238   |
| Гексахлорбензол $C_6Cl_6$ (ж)           | 201,4 |
| 1-Гексен $C_6H_{12}$ (ж)                | 183,3 |
| 1-Гексен $C_6H_{12}$ (г)                | 138,4 |
| 1-Гексин $C_6H_{10}$ (г)                | 130,5 |
| Гептан $C_7H_{14}$ (ж)                  | 224,7 |
| Гептан $C_7H_{14}$ (г)                  | 170,7 |
| Глицерин $C_3H_8O_3$ (ж) [21]           | 217   |
| Глицин $C_2H_5O_2N$ (кр)                | 100,3 |
| Декан $C_{10}H_{22}$ (ж)                | 314,5 |
| Декан $C_{10}H_{22}$ (г)                | 243,1 |
| Дибромметан $CH_2Br_2$ (ж) [2, 4]       | 127,4 |
| Дибромметан $CH_2Br_2$ (г) [2, 4]       | 54,5  |
| 1,2-Дибромэтан $C_2H_4Br_2$             | 136,0 |
| 2,2-Диметилпропан $C_5H_{12}$ (г)       | 121,6 |
| 1,4-Диоксан $C_4H_8O_2$ (ж) [33]        | 152,9 |
| Дифторбромметан $CHF_2Br$ (г) [2]       | 58,8  |
| Дифтордибромметан $CF_2Br_2$ (г)        | 77,0  |
| Дифтордихлорметан $CF_2Cl_2$ (г)        | 72,3  |
| Дифторметан $CH_2F_2$ (г) [2]           | 42,9  |
| Дифторхлорбромметан $CF_2ClBr$ (г)      | 74,6  |
| Дифторхлорметан $CHF_2Cl$ (г) [2]       | 55,8  |
| Дихлорметан $CH_2Cl_2$ (ж) [2, 4]       | 100   |
| То же (г)                               | 50,9  |
| 1-1-Дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$ (ж)         | 126,3 |
| 1,1-Дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$ (г)         | 76,2  |
| 1,1-Дихлорэтен $C_2H_3Cl_2$ (ж)         | 111,3 |
| 1,1-Дихлорэтен $C_2H_3Cl_2$ (г)         | 67,0  |
| Дифениловый эфир $C_{12}H_{10}O$ , (тв) | 216,6 |
| Диэтиловый эфир $C_6H_{14}O$ (г)        | 65,9  |
| Иодметан $CH_3I$ (ж) [2, 4]             | 127,2 |
| Иодметан $CH_3I$ (г) [2, 4]             | 44,1  |
| Кетен $C_2H_2O$ (г)                     | 47,9  |
| орто-Ксилол $C_8H_{10}$ (ж) [21]        | 183   |
| Кумол $C_9H_{12}$ (ж) [21]              | 189   |

| Вещество, формула, состояние                     | $C_p$   |
|--------------------------------------------------|---------|
| Кумол $C_9H_{12}$ (г) [21]                       | 134     |
| Метан*1 [2] $CH_4$ (г) [2]                       | 35,7    |
| Метанол $CH_4O$ (ж) [2, 4]                       | 81,6    |
| Метанол $CH_4O$ (г) [2, 4]                       | 44,1    |
| Метантиоль $CH_4S$ (г)                           | 50,7    |
| Метиламин $CH_5N$ (г)                            | 51,7    |
| 2-Метил-1,3-бутадиен $C_5H_8$ (ж)                | 154,6   |
| То же (г)                                        | 104,6   |
| 2-Метилбутан $C_5H_{12}$ (ж)                     | 164,9   |
| То же (г)                                        | 120,6   |
| 2-Метил-1-бутен $C_5H_{10}$ (ж)                  | 157,2   |
| То же (г)                                        | 111,6   |
| 3-Метил-1-бутин $C_5H_8$ (г)                     | 104,7   |
| 2-Метиопропан $C_4H_{10}$ (г)                    | 93,8    |
| 2-Метил-1-пропен $C_4H_8$ (г)                    | 89,1    |
| Метициклопентан $C_6H_{12}$ (ж)                  | 158,7   |
| То же (г)                                        | 109,8   |
| Муравьиная кислота $CH_2O_2$ (ж) [2, 4]          | 158,7   |
| То же (г)                                        | 109,8   |
| Нафталин $C_{10}H_8$ (тв)                        | 165,7   |
| Нафталин $C_{10}H_8$ (г)                         | 134,2   |
| Нонан $C_9H_{20}$ (ж)                            | 284,4   |
| Нонан $C_9H_{20}$ (г)                            | 219     |
| Октан $C_8H_{18}$ (ж)                            | 254,1   |
| Октан $C_8H_{18}$ (г)                            | 194,9   |
| 1-Октен $C_8H_{16}$ (ж)                          | 241,2   |
| 1-Октен $C_8H_{16}$ (г)                          | 186,6   |
| Пентан $C_5H_{12}$ (ж)                           | 171,5   |
| Пентан $C_5H_{12}$ (г)                           | 122,6   |
| 1-Пентанол $C_5H_{12}O$ (ж)                      | 209,2   |
| 1-Пентен $C_5H_{10}$ (ж)                         | 155,3   |
| 1-Пентен $C_5H_{10}$ (г)                         | 114,6   |
| 1-Пентин $C_5H_8$ (г)                            | 106,7   |
| Пропадиев $C_3H_4$ (г)                           | 59,0    |
| Пропан*1 $C_3H_8$ (г)                            | 73,5    |
| 1-Пропанол $C_3H_8O$ (ж)                         | 148,6   |
| Пропен $C_3H_6$ (г)                              | 63,6    |
| Пропин $C_3H_4$ (г)                              | 60,7    |
| Стирол $C_8H_8$ (ж)                              | 182,9   |
| Стирол $C_8H_8$ (г)                              | 122,1   |
| Тетрабромметан $CBr_4$ (тв)                      | 128,0   |
| То же (г)                                        | 91,2    |
| Тетрафторметан $CF_4$ (г)                        | 61,1    |
| Толуол $C_7H_8$ (ж) [4, 21]                      | 154—166 |
| Толуол $C_7H_8$ (г) [4, 21]                      | 103,6   |
| Трибромметан $CHBr_3$ (ж)                        | 134,8   |
| То же (г)                                        | 71,1    |
| 2,2,4-Триметилпентан $C_8H_{18}$ (ж)             | 239,5   |
| Трифторбромметан $CF_3Br$ (г) [21]               | 69,3    |
| Трифторметан*1 $CHF_3$ (г)                       | 51,1    |
| Трифторхлорметан $CF_3Cl$ (г)                    | 66,9    |
| Трифторхлорэтан $C_2H_2F_3Cl$ (г) [2]            | 51,0    |
| Трихлорметан $CHCl_3$ (ж) [2, 4]                 | 116,3   |
| То же (г)                                        | 66,8    |
| 1,2,2-Трифтор-1,1,2-трихлорэтан $C_2F_3Cl_3$ (ж) | 176     |
| То же (г)                                        | 116     |
| Углерод четыреххлористый $CCl_4$ (ж)             | 131,7   |
| То же (г)                                        | 82,9    |
| Уксусная кислота, мономер $C_2H_4O_2$ (ж)        | 123,4   |
| То же (г)                                        | 66,5    |
| Фенол $C_6H_6O$ (тв)                             | 134,7   |
| Формальдегид $CH_2O$ (г) [2]                     | 35,4    |
| Фосген $COCl_2$ (г) [2]                          | 58,0    |
| Фторбензол $C_6H_5F$ (ж)                         | 146,4   |
| То же (г)                                        | 94,4    |

| Вещество, формула, состояние                       | $C_p$ |
|----------------------------------------------------|-------|
|                                                    |       |
| Фторбромметан $\text{CH}_2\text{FBr}$ (г) [2]      | 49,1  |
| Фтордихлорметан $\text{CHFCl}_2$ (г)               | 61,0  |
| Фторметан $\text{CH}_3\text{F}$ (г) [2]            | 37,5  |
| Фтортрибромметан $\text{CFBr}_3$ (г) [2]           | 84,2  |
| Фтортрихлорметан $\text{CFCl}_3$ (г)               | 78,1  |
| Фторхлорметан $\text{CH}_2\text{FCl}$ (г)          | 47,0  |
| Фторэтан $\text{C}_2\text{H}_5\text{F}$            | 58,6  |
| Фуран $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$ (ж)           | 114,6 |
| То же (г)                                          | 65,4  |
| Хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ (ж)     | 150,1 |
| То же (г)                                          | 97,1  |
| Хлорметан $\text{CH}_3\text{Cl}$ (г)               | 40,7  |
| 2-Хлорпропан $\text{C}_3\text{H}_7\text{Cl}$ (г)   | 87,6  |
| Хлорэтан $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ (г)       | 62,3  |
| Хлорэтен $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ (г)       | 53,7  |
| Циклобутан $\text{C}_4\text{H}_8$ (г)              | 72,2  |
| Циклобутен $\text{C}_4\text{H}_6$ (г) [33]         | 67,1  |
| Циклогексан $\text{C}_6\text{H}_{12}$ (ж)          | 156,5 |
| То же (г)                                          | 106,3 |
| Циклогексен $\text{C}_6\text{H}_{10}$ (ж)          | 140,2 |
| То же (г)                                          | 105,0 |
| Циклопентан $\text{C}_5\text{H}_{10}$ (ж)          | 126,8 |
| То же (г)                                          | 82,9  |
| Циклопентен $\text{C}_5\text{H}_8$ (ж)             | 122,4 |
| То же (г)                                          | 75,1  |
| Циклопропан $\text{C}_3\text{H}_6$ (г)             | 55,9  |
| Этан* $\text{C}_2\text{H}_6$ (г)                   | 52,5  |
| Этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ (ж) [2, 4]   | 111,4 |
| То же (г)                                          | 65,8  |
| Этантиоль $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$ (ж)       | 117,8 |
| То же (г)                                          | 72,7  |
| Этен* $\text{C}_2\text{H}_4$ (г) [2]               | 42,9  |
| Этилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ (ж)    | 170   |
| Этилбензол $\text{C}_8\text{H}_{10}$ (ж)           | 186   |
| То же (г)                                          | 128   |
| Этилена оксид $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ (г)   | 48,5  |
| Этиленгликоль $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ (ж) | 151   |
| Этин $\text{C}_2\text{H}_2$ (г) [2]                | 44,0  |

\* См. также табл. 9.14.

Таблица 9.13. Молярная изобарная теплоемкость  $C_p$ , Дж/(моль·К), органических соединений при температуре от 20 до 1500 К [33]

Верхняя шкала температур относится к конденсированному состоянию, нижняя — к газу (г — газ; к — конденсат)

| Вещество и состояние       | Температура, К |       |       |       |
|----------------------------|----------------|-------|-------|-------|
|                            | к: 20          | 40    | 80    | 150   |
|                            | г: 400         | 600   | 1000  | 1500  |
| Азулен (г)                 | 176,4          | 248,2 | 327,4 | —     |
| Ацетальдегид (г)           | 65,81          | 85,86 | 112,8 | —     |
| Ацетон (к)                 | 10,3           | 30,2  | 56,8  | 83,2  |
| Ацетон (г)                 | 92,05          | 122,8 | 163,8 | 191,3 |
| Бензойная кислота (к) [61] | 11,24          | 32,18 | 56,77 | 84,14 |
| Бензол (к)                 | 8,37           | 26,53 | 44,93 | 64,64 |
| Бензол (г)                 | 111,9          | 157,9 | 209,9 | 241,3 |
| Бромметан (к)              | 10,71          | 26,24 | 45,15 | 56,23 |

| Вещество и состояние   | Температура, К |       |       |        |
|------------------------|----------------|-------|-------|--------|
|                        | к: 20          | 40    | 80    | 150    |
|                        | г: 400         | 600   | 1000  | 1500   |
| Бромметан (г)          | 49,92          | 62,63 | 79,50 | 91,25  |
| Бутан (к)              | 4,52           | 27,45 | 55,65 | 115,1  |
| Бутан (г)              | 124,7          | 169,1 | 226,8 | 265,7  |
| 1-Бутен (к)            | 8,21           | 28,48 | 53,89 | 105,4  |
| 1-Бутен (г)            | 112,7          | 149,9 | 197,7 | 229,8  |
| Гексан (к)             | 10,84          | 34,64 | 70,08 | 109,0  |
| Гексан (г)             | 184,3          | 248,4 | 330,3 | 385,0  |
| Диметиловый эфир (к)   | 8,20           | 24,89 | 47,91 | 98,91  |
| Дифтордихлорметан (г)  | 85,60          | 95,35 | 102,8 | —      |
| Дифтордихлорметан (г)  | 98,66          | 112,0 | 123,4 | 128,3  |
| Дихлорэтан (к)         | 12,26          | 32,55 | 54,02 | 91,21  |
| Дихлорэтан (г)         | 92,22          | 112,4 | 138,3 | 155,3  |
| Кетен (к)              | 56,15          | 69,58 | 83,81 | 93,93  |
| орто-Ксилол (к)        | 11,00          | 31,80 | 60,38 | 96,06  |
| орто-Ксилол (г)        | 171,7          | 234,2 | 311,1 | 359,5  |
| Метан* (к) [33, 47]    | —              | 28,66 | 40,58 | —      |
| Метан* (г) [33, 47]    | 40,6           | 52,49 | 72,80 | 86,7   |
| Метанол                | 5,86           | 18,33 | 37,66 | 55,65  |
| Метанол (г)            | 51,42          | 67,03 | 89,45 | —      |
| Муравьиная кислота (к) | 4,10           | 14,16 | 29,43 | 44,14  |
| То же (г)              | 56,96          | 69,66 | 89,68 | 94,27  |
| Нафталин (к)           | 9,37           | 30,12 | 51,99 | 81,75  |
| Нафталин (г)           | 180,7          | 250,8 | 328,8 | 374,4  |
| Пентан (к)             | 10,25          | 31,00 | 62,84 | 140,6  |
| Пентан (г)             | 154,4          | 208,7 | 278,5 | 325,3  |
| 1-Пентен (к)           | 10,54          | 32,93 | 61,92 | 129,2  |
| 1-Пентен (г)           | 143,1          | 189,8 | 249,4 | 289,4  |
| Пропан* (к) [33, 48]   | 6,66           | 25,08 | 50,38 | 89,03  |
| Пропан (г) [33, 48]    | 94,0           | 129,2 | 175,0 | 206,1  |
| Пропен (к)             | 9,58           | 28,95 | 53,51 | 87,11  |
| Пропен (г)             | 79,91          | 107,5 | 144,2 | 169,0  |
| 2-Пропанол (к)         | 8,41           | 24,7  | 46,1  | 74,1   |
| Стирол (к)             | 11,71          | 32,28 | 56,19 | 90,75  |
| Стирол (г)             | 160,3          | 218,2 | 284,2 | 324,6  |
| Тетрафторметан (к)     | 20,29          | 42,80 | 67,36 | —      |
| То же (г)              | 72,63          | 87,03 | 98,95 | —      |
| Толуол (г)             | 139,1          | 194,9 | 260,2 | 300,3  |
| Трифторметан* (г)      | 61,04          | 75,86 | 90,92 | —      |
| Трифторхлорметан (г)   | 77,59          | 90,37 | 100,5 | 104,5  |
| Уксусная кислота (к)   | —              | —     | —     | 59,5   |
| То же (г)              | 81,67          | 105,2 | 133,8 | 152,5  |
| Формальдегид (г)       | 39,19          | 48,10 | 61,90 | 71,10  |
| Фтордихлорметан (г)    | 70,08          | 82,47 | 94,22 | 100,5  |
| Фторметан (г)          | 44,02          | 57,74 | 77,11 | 90,21  |
| Фтордихлорметан (к)    | 21,40          | 40,05 | 55,35 | 83,89  |
| То же (г)              | 87,04          | 96,66 | 103,4 | 105,9  |
| Хлорметан (к)          | 6,28           | 22,51 | 42,38 | 62,34  |
| То же (г)              | 48,12          | 61,25 | 78,91 | 91,00  |
| Четыреххлористый угле- | 21,33          | 40,92 | 58,91 | 84,89  |
| род (к)                | —              | —     | —     | —      |
| То же (г)              | 91,71          | 99,66 | 104,8 | —      |
| Этан* (к) [33, 49]     | 6,42           | 24,87 | 53,22 | 71,0   |
| Этан* (г) [33, 49]     | 65,65          | 89,3  | 122,7 | 146,0  |
| Этанол кристалличе-    | 7,155          | 17,25 | 40,80 | —      |
| ский (к)               | —              | —     | —     | —      |
| Этанол аморфный (к)    | 8,290          | 24,07 | 46,38 | —      |
| Этанол (г)             | 87,56          | 112,2 | 145,0 | 167,7  |
| Этен* (к)              | 6,36           | 23,70 | 48,33 | 66,78  |
| Этен (г)               | 53,12          | 71,55 | 94,43 | 110,29 |
| Этин (г)               | 50,10          | 57,44 | 66,62 | 74,07  |

\* См. также табл. 9.14.

Таблица 9.14. Зависимость удельной изобарной теплоемкости  $c_p$ , кДж/(кг · К), органических жидкостей и газов от давления и температуры

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе

| Т, К | Давление, МПа |   |    |    | Т, К | Давление, МПа |   |    |    |
|------|---------------|---|----|----|------|---------------|---|----|----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 20 |      | 0,1           | 1 | 10 | 20 |

Дифторхлорметан (фреон-22)  $\text{CHF}_2\text{Cl}$  [46]

|        |              |              |       |       |        |       |       |       |       |
|--------|--------------|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 273,15 | <u>0,621</u> | 1,161        | 1,125 | 1,105 | 403,15 | 0,768 | 0,807 | 2,169 | 1,334 |
| 303,15 | 0,657        | <u>0,842</u> | 1,166 | 1,114 | 453,15 | 0,813 | 0,830 | 1,422 | 1,465 |
| 353,15 | 0,720        | 0,804        | 1,378 | 1,225 | 473,15 | 0,830 | 0,841 | 1,228 | 1,454 |

Продолжение

| Т, К | Давление, МПа |   |    |     | Т, К | Давление, МПа |   |    |     |
|------|---------------|---|----|-----|------|---------------|---|----|-----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |

Метан  $\text{CH}_4$  [47]

|     |              |              |       |       |      |       |       |       |       |
|-----|--------------|--------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 100 | 3,258        | 3,255        | 3,226 | —     | 200  | 2,106 | 2,294 | 5,321 | 2,962 |
| 110 | 3,390        | 3,379        | 3,289 | —     | 300  | 2,236 | 2,290 | 3,018 | 3,047 |
| 120 | <u>2,192</u> | 3,549        | 3,431 | 3,046 | 400  | 2,534 | 2,559 | 2,808 | 3,149 |
| 130 | 2,163        | 3,683        | 3,523 | 3,202 | 600  | 3,273 | 3,282 | 3,367 | 3,612 |
| 140 | 2,141        | <u>3,822</u> | 3,580 | 3,230 | 800  | 3,959 | 3,964 | 4,006 | 4,175 |
| 150 | 2,125        | <u>2,941</u> | 3,644 | 3,187 | 1000 | 4,539 | 4,542 | 4,568 | 4,691 |

Продолжение

| Т, К | Давление, МПа |   |    |    | Т, К | Давление, МПа |   |    |    |
|------|---------------|---|----|----|------|---------------|---|----|----|
|      | 0,1013        | 1 | 10 | 70 |      | 0,1013        | 1 | 10 | 70 |

Пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$  [48]

|     |              |       |       |       |     |       |              |       |       |
|-----|--------------|-------|-------|-------|-----|-------|--------------|-------|-------|
| 90  | 1,911        | 1,911 | 1,908 | —     | 300 | 1,696 | <u>2,751</u> | 2,556 | 2,317 |
| 100 | 1,923        | 1,922 | 1,919 | 1,903 | 350 | 1,916 | <u>2,050</u> | 3,012 | 2,544 |
| 150 | 1,998        | 1,997 | 1,988 | 1,953 | 400 | 2,136 | 2,209        | 3,915 | 2,795 |
| 200 | <u>2,125</u> | 2,122 | 2,099 | 2,028 | 500 | 2,552 | 2,586        | 3,238 | 3,052 |
| 250 | <u>1,496</u> | 2,336 | 2,277 | 2,145 | 700 | 3,239 | 3,252        | 3,394 | 3,573 |

Продолжение

| Т, К | Давление, МПа |   |    |    | Т, К | Давление, МПа |   |    |    |
|------|---------------|---|----|----|------|---------------|---|----|----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 20 |      | 0,1           | 1 | 10 | 20 |

Трифторметан (фреон-23)  $\text{CHF}_3$  [46]

|        |              |              |       |       |        |       |       |       |       |
|--------|--------------|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 233,15 | <u>0,663</u> | 0,824        | 0,727 | 0,661 | 353,15 | 0,812 | 0,856 | 1,973 | 1,581 |
| 253,15 | 0,683        | <u>0,890</u> | 1,195 | 1,112 | 403,15 | 0,879 | 0,904 | 1,298 | 1,510 |
| 303,15 | 0,745        | 0,828        | 1,796 | 1,421 | 453,15 | 0,940 | 0,956 | 1,162 | 1,343 |

| T, К | Давление, МПа |   |    |    | T, К | Давление, МПа |   |    |    |
|------|---------------|---|----|----|------|---------------|---|----|----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 70 |      | 0,1           | 1 | 10 | 70 |

Этан  $C_2H_6$  [49]

|     |       |       |       |       |     |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 120 | 2,296 | 2,293 | 2,274 | 2,250 | 220 | 1,511 | 2,607 | 2,500 | 2,301 |
| 140 | 2,356 | 2,354 | 2,335 | 2,277 | 240 | 1,561 | 2,834 | 2,633 | 2,360 |
| 160 | 2,362 | 2,359 | 2,332 | 2,222 | 300 | 1,765 | 1,910 | 3,457 | 2,527 |
| 180 | 2,392 | 2,387 | 2,347 | 2,205 | 400 | 2,182 | 2,227 | 3,211 | 2,838 |
| 200 | 1,476 | 2,467 | 2,404 | 2,243 | 500 | 2,597 | 2,620 | 2,914 | 3,136 |

Продолжение

| T, К | Давление, МПа |   |    |     | T, К | Давление, МПа |   |    |     |
|------|---------------|---|----|-----|------|---------------|---|----|-----|
|      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |      | 0,1           | 1 | 10 | 100 |

Этилен  $C_2H_4$  [50]

|     |       |       |       |       |     |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 130 | 2,400 | 2,398 | 2,382 | 2,354 | 300 | 1,544 | 1,639 | 4,299 | 2,279 |
| 150 | 2,381 | 2,379 | 2,346 | 2,186 | 350 | 1,716 | 1,767 | 3,308 | 2,367 |
| 200 | 1,321 | 2,529 | 2,424 | 2,190 | 400 | 1,894 | 1,927 | 2,510 | 2,456 |
| 250 | 1,397 | 1,644 | 2,773 | 2,209 | 450 | 2,067 | 2,091 | 2,414 | 2,547 |

## 9.5. ТЕПЛОЕМКОСТЬ РАСТВОРОВ, СМЕСЕЙ, СПЛАВОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В табл. 9.15—9.20 и на рис. 9.11, 9.12 приведены значения удельной теплоемкости для различных сплавов и технических материалов.

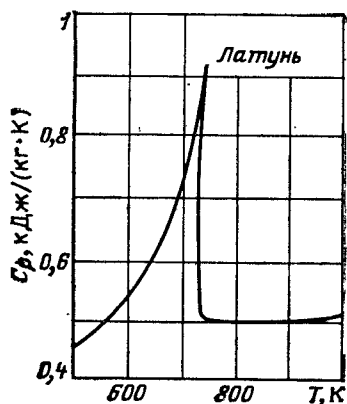


Рис. 9.11. Удельная изобарная теплоемкость  $\beta$ -латуни (массовые доли Cu — 51,8%, Zn — 48,2%) вблизи точки упорядочения [4]

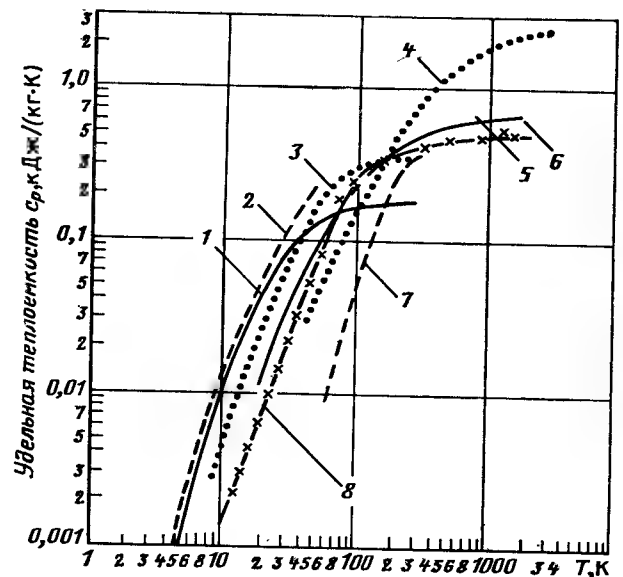


Рис. 9.12. Удельная теплоемкость некоторых сталей, сплавов и графита:

1 — припой (Pb — 50%; Sn — 50%); [5]; 2 — сплав Вуда [5, 33]; 3 — латунь Л-62 [5]; 4 — графит [5, 13, 58]; 5 — СТ-45 [13]; 6 — СТ-X18H9T, СТ-X18H10T; 7 — константан [5, 33]; 8 — молибден [5, 33]



Таблица 9.15. Зависимость удельной изобарной теплоемкости  $c_p$ , кДж/(кг · К), воздуха от давления и температуры [56, 57]

| T, К | Давление, МПа |       |       |       | T, К | Давление, МПа |       |       |       |
|------|---------------|-------|-------|-------|------|---------------|-------|-------|-------|
|      | 0,1           | 1     | 10    | 100   |      | 0,1           | 1     | 10    | 100   |
| 110  | 1,028         | 1,495 | 2,011 | 1,683 | 400  | 1,014         | 1,022 | 1,089 | 1,244 |
| 120  | 1,020         | 1,280 | 2,114 | 1,704 | 600  | 1,052         | 1,054 | 1,080 | 1,176 |
| 150  | 1,011         | 1,107 | 2,847 | 1,575 | 1000 | 1,141         | 1,142 | 1,150 | 1,191 |
| 200  | 1,007         | 1,048 | 1,641 | 1,433 | 1500 | 1,211         | 1,212 | 1,214 | 1,233 |
| 300  | 1,007         | 1,021 | 1,163 | 1,331 | 2000 | —             | —     | 1,252 | 1,261 |

Таблица 9.16. Удельная теплоемкость  $c_p$ , кДж/(кг · К), углеродистых сталей и чугуна при различной температуре T, К

| Марка стали и чугуна               | T    | $c_p$ | Литература |
|------------------------------------|------|-------|------------|
| Ст 08                              | 1173 | 0,65  | [33]       |
| То же                              | 1573 | 0,66  | [33]       |
| Ст 20                              | 300  | 0,461 | [13]       |
| То же                              | 1000 | 0,673 | [13]       |
| Ст 35                              | 300  | 0,462 | [13]       |
| То же                              | 1000 | 0,564 | [13]       |
| Ст У8                              | 300  | 0,462 | [13]       |
| То же                              | 1200 | 0,662 | [13]       |
| Сталь листовая электро-техническая | 80   | 0,358 | [5]        |
|                                    | 150  | 0,389 | [5]        |
|                                    | 250  | 0,426 | [5]        |
| Чугун белый                        | 293  | 0,540 | [5]        |
| Чугун СЧ 10                        | 293  | 0,500 | [5]        |

Таблица 9.17. Удельная теплоемкость  $c_p$ , кДж/(кг · К), легированных сталей при различной температуре T, К

| Марка стали                | T    | $c_p$ | Литература |
|----------------------------|------|-------|------------|
| 15Л, 25Л, 45Л, 55Л         | 300  | 0,457 | [13]       |
|                            | 800  | 0,485 | [13]       |
| 13Н2ХА                     | 300  | 0,452 | [13]       |
| То же                      | 1000 | 0,612 | [13]       |
| P18                        | 373  | 0,42  | [63]       |
| То же                      | 973  | 0,69  | [63]       |
| 11P3AM3Ф2                  | 373  | 0,43  | [63]       |
| То же                      | 973  | 1,01  | [63]       |
| P6M5                       | 373  | 0,44  | [63]       |
| То же                      | 973  | 0,91  | [63]       |
| 4X13                       | 300  | 0,485 | [13]       |
| То же                      | 1000 | 0,598 | [13]       |
| 1X12B2MФ                   | 300  | 0,485 | [13]       |
| То же                      | 1200 | 0,620 | [13]       |
| X5M                        | 300  | 0,482 | [13]       |
| То же                      | 1400 | 0,660 | [13]       |
| 30XM, 30XMA, 30XГС, 30XГСА | 300  | 0,461 | [13]       |
|                            | 800  | 0,49  | [13]       |
| 1X11MФ, 1X12B1MФ           | 300  | 0,483 | [13]       |
| То же                      | 800  | 0,955 |            |
| 25X2MФА                    | 300  | 0,481 | [13]       |
| То же                      | 800  | 0,506 |            |
| ХН35ВТ (ЭИ612, ЭИ612К)     | 300  | 0,495 | [13]       |
| То же                      | 1000 | 0,570 |            |
| X17H13M2T (ЭИ448)          | 300  | 0,510 | [13]       |
| То же                      | 1000 | 0,650 |            |
| X16H25M6 (ЭИ395)           | 300  | 0,490 | [13]       |
| То же                      | 600  | 0,525 |            |

Продолжение табл. 9.17

| Марка стали   | T    | $c_p$     | Литература |
|---------------|------|-----------|------------|
| X22H26, ВЖ100 | 300  | 0,485     | [13]       |
| То же         | 1000 | 0,535     |            |
| ШХ15          | 300  | 0,48—0,53 | [5]        |

Таблица 9.18. Удельная теплоемкость  $c_p$ , кДж/(кг · К), двухкомпонентных сплавов, не содержащих железа [33], при различной температуре

| Вещество                | T, К    | $c_p$ |
|-------------------------|---------|-------|
| 67% Al, 33% Cu          | 123     | 0,42  |
| То же                   | 273     | 0,60  |
| 50% Al, 50% Cu          | 123     | 0,35  |
| То же                   | 273     | 0,51  |
| 33% Al, 67% Cu          | 373     | 0,46  |
| То же                   | 773     | 0,53  |
| 25% Al, 75% Cu          | 123     | 0,31  |
| То же                   | 273     | 0,43  |
| 92% Al, 8% Mg           | 293     | 1,15  |
| 32% Al, 68% V           | 288—373 | 0,66  |
| 60% Al, 40% Zn          | 293—373 | 0,56  |
| 80% Au, 20% Cu          | 137     | 0,164 |
| То же                   | 285     | 0,183 |
| 55,5% Bi, 44,5% Pb [13] | 403     | 0,147 |
|                         | 973     | 0,147 |
| 50% Bi, 50% Sn          | 273—373 | 0,182 |
| 25% Bi, 75% Sn          | 273—373 | 0,209 |
| 32% Cd, 68% Sn          | 196—293 | 0,232 |
| 67% Cu, 33% Mg          | 123     | 0,30  |
|                         | 673     | 0,57  |
| 33% Cu, 67% Mg          | 123     | 0,44  |
| То же                   | 273     | 0,61  |
| 68% Cu, 32% Mg          | 137     | 0,35  |
| То же                   | 285     | 0,41  |
| 90% Cu, 10% Ni          | 137     | 0,31  |
| То же                   | 285     | 0,38  |
| 10% Ir, 90% Pt          | 293—373 | 0,135 |
| 78% K, 22% Na (ж) [13]  | 300     | 0,971 |
| То же                   | 600     | 0,879 |
| »                       | 1000    | 0,888 |
| 44% K, 56% Na (ж) [13]  | 300     | 1,16  |
| То же                   | 600     | 1,06  |
| »                       | 1000    | 1,05  |
| 90% Mn, 10% Ni          | 137     | 0,39  |
| То же                   | 285     | 0,46  |
| 55% Mn, 45% Ni          | 137     | 0,39  |
| То же                   | 285     | 0,46  |
| 36% Pb, 64% Tl          | 273—298 | 0,128 |

Таблица 9.19. Удельная теплоемкость  $c_p$ , кДж/(кг·К), многокомпонентных сплавов при различной температуре  $T$ , К

| Вещество               | $T$     | $c_p$ | Литература |
|------------------------|---------|-------|------------|
| 50% Bi, 31% Pb, 19% Sn | 273     | 0,138 | [13]       |
| 48% Bi, 26% Pb, 13% Cd | 273     | 0,180 | [33]       |
| Алюмель                | 273     | 0,52  | [33]       |
| Липовица сплав         | 278—323 | 0,144 | [33]       |
| То же                  | 373—423 | 0,178 | [33]       |
| Нихром                 | 293     | 0,46  | [5]        |
| Розе сплав             | 196—293 | 0,147 | [33]       |
| То же                  | 293—362 | 0,23  | [33]       |

Таблица 9.20. Удельная теплоемкость  $c_p$ , кДж/(кг·К), неметаллических технических материалов при различной температуре  $T$ , К

| Вещество                                       | $T$      | $c_p$ | Литература |
|------------------------------------------------|----------|-------|------------|
| <b>Огнеупоры</b>                               |          |       |            |
| Алундум                                        | 373      | 0,78  | [33]       |
| Глинозем                                       | 373      | 0,84  | [33]       |
| »                                              | 1773     | 1,15  | [33]       |
| Карборунд                                      | 273      | 0,93  | [13]       |
| »                                              | 1273     | 1,06  | [13]       |
| Кирпич динасовый                               | 273      | 0,90  | [13]       |
| То же                                          | 1273     | 1,16  | [13]       |
| Кирпич магнезитовый                            | 273      | 1,05  | [13]       |
| То же                                          | 1273     | 1,32  | [13]       |
| Кирпич хромитовый                              | 273      | 0,90  | [13]       |
| То же                                          | 1273     | 1,17  | [13]       |
| Кирпич шамотный                                | 273      | 0,88  | [13]       |
| То же                                          | 1273     | 1,14  | [13]       |
| Силлиманит                                     | 273      | 0,90  | [13]       |
| »                                              | 1273     | 1,16  | [13]       |
| Уголь электродный                              | 300—350  | 0,70  | [33]       |
| То же                                          | 300—810  | 0,83  | [33]       |
| »                                              | 300—1723 | 1,62  | [33]       |
| Фарфор высоковольтный                          | 300      | 0,75  | [13]       |
| Фарфор низковольтный                           | 300      | 0,85  | [13]       |
| Фарфор установочный                            | 300      | 0,92  | [13]       |
| Циркон                                         | 273      | 0,55  | [13]       |
| »                                              | 1273     | 0,68  | [13]       |
| <b>Пластические вещества, полимеры, резина</b> |          |       |            |
| Бакелит                                        | 300      | 0,82  | [5]        |
| Винипласт                                      | 293      | 1,0   | [33]       |
| Капрон                                         | 293      | 2,3   | [33]       |
| Найлон-6                                       | 100      | 0,6   | [5]        |
| »                                              | 200      | 1,0   | [5]        |
| »                                              | 300      | 1,5   | [5]        |
| Парафин                                        | 253—276  | 1,6   | [33]       |
| Парафин жидкий                                 | 333      | 3,0   | [33]       |
| Поликарбонат                                   | 100      | 0,43  | [5]        |
| »                                              | 300      | 1,21  | [5]        |
| Полиметилакрилат (плексиглас, оргстекло)       | 100      | 0,55  | [5]        |
| То же                                          | 200      | 1,05  | [5]        |
| То же                                          | 300      | 1,50  | [5]        |
| Полистирол ячеистый                            | 100      | 0,44  | [5]        |
| ПС-1                                           |          |       |            |
| То же                                          | 300      | 0,34  | [5]        |
| Политетрафторэтилен                            | 5        | 0,006 | [5]        |
| (фторопласт-4, тефлон)                         | 20       | 0,08  | [5]        |
| То же                                          | 50       | 0,21  | [5]        |
| »                                              | 100      | 0,39  | [5]        |

Продолжение табл. 9.20

| Вещество                                                                     | $T$      | $c_p$     | Литература |
|------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------------|
| Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон)                                   | 200      | 0,70      | [5]        |
| То же                                                                        | 300      | 1,16      | [5]        |
| Полихлортрифторэтилен                                                        | 293      | 0,92      | [33]       |
| Полиэтилен                                                                   | 100      | 0,62      | [33]       |
| »                                                                            | 293      | 2,5       | [33]       |
| Полиэфирные пластмассы                                                       | 293      | 1—2,3     | [33]       |
| Пресс-материал АГ-4С                                                         | 293      | 1,17      | [5]        |
| Резина                                                                       | 300      | 1,9       | [5]        |
| Эбонит                                                                       | 293      | 1,43      | [33]       |
| Этролы целлюлозные                                                           | —        | 1,6       | [33]       |
| <b>Природные вещества, минералы</b>                                          |          |           |            |
| Андалузит                                                                    | 273—373  | 0,70      | [33]       |
| Апатит                                                                       | 288—372  | 0,79      | [33]       |
| Асбест                                                                       | 293      | 1,1       | [5]        |
| Аугит                                                                        | 293—371  | 0,81      | [33]       |
| Берилл                                                                       | 323      | 0,84      | [33]       |
| Боракс                                                                       | 308      | 0,67      | [33]       |
| Базальт                                                                      | 273      | 0,85      | [33]       |
| »                                                                            | 1473     | 1,49      | [33]       |
| Гипс                                                                         | 73       | 0,32      | [33]       |
| »                                                                            | 273      | 1,06      | [33]       |
| Гнейс                                                                        | 273      | 0,74      | [33]       |
| »                                                                            | 473      | 1,02      | [33]       |
| Гранит                                                                       | 273      | 0,65      | [33]       |
| »                                                                            | 1073     | 1,30      | [33]       |
| Графит природный                                                             | 300      | 0,95—1,05 | [5]        |
| Грунт                                                                        | 300      | 0,85      | [13]       |
| Грунт лунный из Моря изобилия                                                | 300      | 0,74      | [5]        |
| Доломит                                                                      | 293—372  | 0,93      | [33]       |
| Каолин                                                                       | 273      | 1,0       | [33]       |
| »                                                                            | 673      | 1,35      | [33]       |
| Лава вулканическая                                                           | 296—373  | 0,84      | [33]       |
| »                                                                            | 304—1049 | 1,09      | [33]       |
| Малахит                                                                      | 288—372  | 0,74      | [33]       |
| Слюда                                                                        | 293      | 0,88      | [33]       |
| Тальк                                                                        | 332      | 0,87      | [33]       |
| Шпинель                                                                      | 282—371  | 0,81      | [33]       |
| Шеелит                                                                       | 323      | 0,4       | [33]       |
| <b>Стекла</b>                                                                |          |           |            |
| Стекло кварцевое                                                             | 293      | 0,89      | [33]       |
| То же                                                                        | 873      | 1,00      | [33]       |
| »                                                                            | 1473     | 1,14      | [33]       |
| Стекло крон                                                                  | 283—288  | 0,67      | [33]       |
| Стекло натриево                                                              | 293—373  | 0,803     | [33]       |
| То же                                                                        | 293—1273 | 1,125     | [33]       |
| Стекло оконное                                                               | 273—573  | 0,67      | [33]       |
| Стекло пирекс                                                                | 173—273  | 0,604     | [33]       |
| То же                                                                        | 273—573  | 0,859     | [33]       |
| »                                                                            | 313—1273 | 1,20      | [33]       |
| Стекло термометрическое 16"                                                  | 292—373  | 0,832     | [33]       |
| Стекло флинт                                                                 | 283—323  | 0,49      | [33]       |
| <b>Стекла из природных силикатов</b>                                         |          |           |            |
| Анорит $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$          | 273—373  | 0,787     | [33]       |
| »                                                                            | 273—973  | 1,007     | [33]       |
| Альбит $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ | 273—373  | 0,827     | [33]       |
| »                                                                            | 273—1173 | 1,104     | [33]       |

| Вещество                                                                                    | T        | $c_p$ | Лите-<br>ратура |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|-----------------|
| Волластонит $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$                                                 | 273—373  | 0,775 | [33]            |
| »                                                                                           | 273—973  | 0,985 | [33]            |
| Диопсид $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$                                   | 273—373  | 0,811 | [33]            |
| »                                                                                           | 273—973  | 1,020 | [33]            |
| Микроклин $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \times$<br>$\times 6\text{SiO}_2$ | 273—373  | 0,803 | [33]            |
| »                                                                                           | 273—1373 | 1,087 | [33]            |
| <b>Строительные материалы</b>                                                               |          |       |                 |
| Асфальт                                                                                     | 298      | 1,68  | [13]            |
| Бетон                                                                                       | 298      | 0,84  | [13]            |
| Бумага, картон                                                                              | 298      | 1,51  | [13]            |
| Войлок                                                                                      | 298      | 1,88  | [13]            |
| Глина                                                                                       | 273      | 0,75  | [33]            |
| »                                                                                           | 673      | 1,13  | [33]            |
| »                                                                                           | 1073     | 1,51  | [33]            |
| Гранит                                                                                      | 298      | 0,92  | [13]            |
| Грунт                                                                                       | 298      | 0,84  | [13]            |
| Дерево                                                                                      | 298      | 1,2   | [33]            |
| Зола                                                                                        | 298      | 0,75  | [13]            |
| Известняк                                                                                   | 273—373  | 0,92  | [33]            |
| Камень строительный                                                                         | 298      | 0,92  | [33]            |
| Кирпич красный                                                                              | 298      | 0,88  | [13]            |
| Кирпич силикатный                                                                           | 298      | 0,84  | [13]            |
| Мел                                                                                         | 298      | 0,88  | [33]            |
| Мрамор                                                                                      | 298      | 0,92  | [13]            |
| Песок речной                                                                                | 298      | 0,84  | [13]            |
| Пробка                                                                                      | 273—373  | 1,8   | [33]            |

| Вещество                       | T        | $c_p$   | Лите-<br>ратура |
|--------------------------------|----------|---------|-----------------|
| Стекло                         | 298      | 0,84    | [13]            |
| Текстолит                      | 298      | 1,5     | [33]            |
| Торфяная засыпка               | 298      | 1,7     | [13]            |
| Фанера                         | 273      | 2,5     | [33]            |
| Цементно-песчаный раст-<br>вор | 298      | 0,84    | [13]            |
| Шлак котельный                 | 298      | 0,75    | [13]            |
| <b>Топлива и масла</b>         |          |         |                 |
| Бензин Б-70                    | 293      | 2,06    | [21]            |
| Бензин Б-70                    | 423      | 2,74    | [21]            |
| Бензин Б-70, пары              | 403      | 2,28    | [21]            |
| То же                          | 523      | 2,58    | [21]            |
| Глицерин                       | 293      | 2,35    | [21]            |
| »                              | 513      | 3,60    | [21]            |
| Керосин Т-1                    | 293      | 2,00    | [21]            |
| То же                          | 423      | 2,63    | [21]            |
| Керосин Т-1, пары              | 423      | 2,37    | [21]            |
| То же                          | 473      | 2,47    | [21]            |
| Мазут                          | 293      | 2,18    | [13]            |
| Масло ВМ-4                     | 243      | 1,44    | [21]            |
| То же                          | 373      | 1,62    | [21]            |
| Масло МС-20                    | 273      | 1,98    | [21]            |
| То же                          | 423      | 2,44    | [21]            |
| Масло трансформаторное         | 223      | 1,70    | [21]            |
| То же                          | 373      | 2,04    | [21]            |
| Масла растительные             | 293      | 1,5—2,0 | [33]            |
| Нефть                          | 293—333  | 2,10    | [33]            |
| Уголь каменный                 | 293—1313 | 1,31    | [33]            |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Термические константы веществ: Справочник/Под ред. В. П. Глушко. М.: ВИНТИ. 1965—1981. Вып. 1—10.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание/Под ред. В. П. Глушко. — 3-е изд. М.: Наука, 1977—1982. Т. 1—4.
3. Selected values of the thermodynamic properties of the elements/R. Hultgren, R. D. Decai, D. T. Hawkins, M. Gleiser, K. K. Kelley, D. D. Wagman. Metals Park (Ohio). Amer. Soc. for Metals. 1973.
4. Landolt H., Bornstein R. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. Bd 2. T. 4—6 Aufl. Berlin: Springer, 1960.
5. Кожевников И. Г., Новицкий Л. А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982.
6. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного азота при температурах 70—1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 4—78. М.: Изд-во стандартов, 1978.
7. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона/В.А. Рабинович, А. А. Вассерман, В. И. Недоступ, Л. С. Векслер. М.: Изд-во стандартов, 1976.
8. McCarty R. D., Hord J., Roder H. H. Selected properties of hydrogen. Washington; Govern. print. off. 1983.
9. Теплофизические свойства щелочных металлов/Э. Э. Шпильрайн, К. А. Якимович, Е. Е. Тоцкий и др./Под ред. В. А. Кирилина. М.: Изд-во стандартов, 1970.
10. Кислород жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 70—1000 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 19—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

11. Медь. Изобарная теплоемкость в диапазоне температур 4—273,15 К. ГСССД 21—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.
12. Справочник по физико-техническим основам криогеники/М. П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович, А. Б. Фрадков/Под ред. М. П. Малкова. — 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985.
13. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1978.
14. Березовский Г. А., Пауков И. Е.//Журн. физ. хим. 1978. Т. 52. № 10. С. 2677—2679.
15. Selected values of the thermodynamic properties of binary alloys/R. Hultgren, R. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser, K. K. Kelley. Metals Park (Ohio)//Amer. Soc. of Metals. 1973.
16. Angus S., Reuck K. M., McCarty R. D. International thermodynamic tables of the fluid state — 4. Helium. Oxford: Pergamon Press, 1977.
17. Cetas T. C., Holste J. C., Swenson C. A.//Phys. Rev. 1969. Vol. 182. N 3. P. 679—685.
18. Holste J. C., Cetas T. C., Swenson C. A.//Rev. Sci. Instrum. 1972. Vol. 43. N 4. P. 670—676.
19. Leopold H. A., Boorse H. A.//Phys. Rev. 1964. Vol. 134. N 5A. P. 1322—1328.
20. Neighbor J. E.//Ibid. 1967. Vol. 155. N 2. P. 384—387.
21. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М.: Наука, 1972.
22. Стюарт//Приборы для научных исследований. 1983. № 1. С. 3—15.
23. Bagatskii M. I., Kucheryany V. A., Manzhelii V. G., Popov V. A.//Phys. Stat. Sol. 1968. Vol. 26. № 2. P. 453—460.
24. Radebaugh R., Keesom H.//Phys. Rev. 1966. Vol. 149. № 1. P. 209—216.

25. Holste J. C.//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 6. № 6. P. 2495—2497.
26. Ahlers G.//Phys. Rev. A. 1970. Vol. 2. № 4. P. 1505—1526.
27. Mertig M., Pompe G., Hegenbarth E.//Solid State Comm. 1984. Vol. 49. № 3. P. 369—372.
28. Кострюкова М. О., Стрелков П. Г.//Докл. АН СССР. 1965. Т. 162. № 3. С. 543—545.
29. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. 1. М.: Мир, 1979.
30. Leopold H. A., Iafrate G. J., Rothwarf F. e. a.//J. of Low Temperature Phys. 1977. Vol. 28. № 3/4. P. 241—261.
31. Hell R. W., Cesier P., Hukin D. A.//J. Phys. F.: Metal Phys. 1984. Vol. 14. № 5. P. 1265—1276.
32. Жирифалько Л. Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975.
33. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
34. Junod A., Staudeman J.-L., Muller J., Spitzli P.//J. Low Temperature. Phys. 1971. Vol. 5. № 1. P. 25—43.
35. Гельд П. В., Калишевич Г. И., Суриков В. И. и др.//Докл. АН СССР. 1974. Т. 215. № 4. С. 833—835.
36. Vieland L. J., Wicklund A. W.//Phys. Rev. 1968. Vol. 166, № 2. P. 424—431.
37. Sandine T. R., Keesom P. H.//Ibid. 1969. Vol. 177. № 3. P. 1370—1383.
38. Wiswanathan R.//J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. № 9. P. 4086—4087.
39. Knapp G. S., Bader S. D., Fisk Z.//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13. № 9. P. 3783—3789.
40. Knapp G. S., Bader S. D., Culbere H. V. e. a.//Ibid. 1975. Vol. 11. № 11. P. 4331—4338.
41. Суриков В. И., Калишевич Г. И., Гельд П. В.//Журн. физ. хим. 1975. Т. 49. № 2. С. 555—556.
42. Теплофизические свойства аммиака//И. Ф. Голубев, В. П. Кияшева, И. И. Перельштейн, Е. Б. Парушин и др. М.: Изд-во стандартов, 1978.
43. Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980.
44. US NBS Circular 564. Properties of Gases. Washington: US Gov. Print. Off., 1955.
45. Angus S., Armstrong B., de Reuk K. M.//International thermodynamic tables of fluid state—3. Carbon dioxide. Oxford: Pergamon Press, 1976.
46. Теплофизические свойства фреонов. Справочные данные. т. 1. Фреоны метанового ряда/В. В. Алтуний, В. З. Геллер, Е. К. Петров и др. М.: Изд-во стандартов, 1980.
47. Метан жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 100—1000 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 18—81. М.: Изд-во стандартов, 1981.
48. Goodwin R. D., Haynes W. H. US NBS monograph. 170. Thermophysical properties of propane from 85 to 700 K at pressures to 79 MPa. Washington: US Gov. Print. Off. 1982.
49. Этан жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 100—500 К и давлениях 0,1—70 МПа. ГСССД 48—83. М.: Изд-во стандартов, 1983.
50. Этилен жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 130—450 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 47—83. М.: Изд-во стандартов, 1983.
51. Пешков В. П.//Успехи физ. наук. 1968. Т. 94. Вып. 4. С. 607—640.
52. Физико-механические и теплофизические свойства металлов/Под ред. Н. Н. Рыкалина. М.: Наука, 1976.
53. Крафтмахер Я. А., Романишина Т. Ю.//Физика твердого тела. 1966. Т. 8. № 6. С. 1966—1967.
54. Новиков И. И., Рошупкин В. В., Мозговой А. Г., Семашко Н. А.//Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 5. С. 858—962.
55. Ferreira da Silva D., Burgemeister E. A., Dokoupil Z.//Phys. Lett. 1967. Vol. 25A. № 5. P. 354—356.
56. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного воздуха при температурах 70—1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 8—79. М.: Изд-во стандартов, 1980.
57. Таблицы рекомендованных справочных данных. Воздух. Плотность, сжимаемость, энтальпия, энтропия, изохорная и изобарная теплоемкости, скорость звука и показатель адиабаты при температурах 1300—2000 К и давлениях от 5 до 100 МПа. ГСССД Р. 32—81.
58. Графит УПВ-1Т. Энтальпия и теплоемкость в диапазоне температур 1200—2900 К. ГСССД 25—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.
59. Selected values of chemical thermodynamic properties/F. D. Rossini, D. D. Wagman, W. H. Evans, S. Levine, I. Jaffe. US Gov. Print. Off. 1952.
60. Selected values of chemical thermodynamic properties/D. D. Wagman, W. H. Evans, V. B. Parker, J. Hallow, S. M. Baily, R. H. Schumm. Washington: US Gov. Print. Off. 1965—1973.
61. Бензойная кислота. Изобарная теплоемкость в диапазоне температур 4—273,15 К. ГСССД 20—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.
62. Стали 12X18H9T и 12X18H10T. Удельная энтальпия и удельная теплоемкость в диапазоне температур 400—1380 К при атмосферном давлении. ГСССД 32—82. М.: Изд-во стандартов, 1983.
63. Сталь инструментальная быстрорежущая. Физические свойства. ГСССД 27—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

# ГЛАВА 10

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ

Э. Б. Гельман

### 10.1. ВВЕДЕНИЕ

Температурным расширением называется эффект изменения размеров тела с изменением температуры при постоянном давлении. Это явление обусловлено несимметричностью потенциала взаимодействия атомов вещества в решетке, что приводит к анизотропии колебаний атомов относительно среднего положения.

Температурным коэффициентом объемного расширения  $\beta$  называется относительное изменение объема  $V$  при нагревании тела на один кельвин

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P.$$

Для анизотропных веществ температурное расширение характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР)  $\alpha$ , который определяется как

$$\alpha = \frac{1}{l} \left( \frac{\partial l}{\partial T} \right)_P,$$

где  $l$  — размер тела в данном направлении.

В общем случае  $\alpha$  — симметричный тензор второго ранга  $\alpha = [\alpha_{ij}]$ . Если  $[\alpha_{ij}]$  привести к главным осям симметрии, то он будет полностью определяться главными значениями ТКЛР  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , так что шар, выделенный в веществе, при нагревании на  $\Delta T$  преобразуется при  $\Delta T \rightarrow 0$  в эллипсоид с осями, пропорциональными  $1 + \alpha_1 \Delta T, 1 + \alpha_2 \Delta T, 1 + \alpha_3 \Delta T$ , причем  $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ . Для кубической сингонии  $\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = \alpha$  и тензор вырождается в скаляр. Для гексагональной (тригональной) сингонии  $\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{\perp}, \alpha_{33} = \alpha_{\parallel}$ , где индекс  $\parallel$  обозначает направление оси шестого (третьего) порядка, а  $\perp$  — направление, перпендикулярное этой оси. Для ромбической сингонии необходимо знать ТКЛР в направлениях осей второго порядка; в кристаллах моноклинии и триклинии сингоний главные оси не определяются однозначно кристаллографической системой координат и зависят от температуры, поэтому температурное расширение таких структур описывают посредством ТКЛР  $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$  в направлении кристаллографических осей координат  $a, b, c$ .

Помимо коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , которые называют истинными, для характеристики температурного расширения используют средние температурные коэффициенты

расширения, определяемые как средние значения истинных коэффициентов на конечном интервале температуры  $\Delta T$ :

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l} \left( \frac{\Delta l}{\Delta T} \right)_P; \quad \bar{\beta} = \frac{1}{V} \left( \frac{\Delta V}{\Delta T} \right)_P,$$

а также (для анизотропных веществ) средний по направ-

$$\text{лению ТКЛР } \alpha_{ср} = \frac{1}{3} \beta = \frac{1}{3} (\alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33}). \text{ Единица}$$

измерения всех температурных коэффициентов расширения  $K^{-1}$ .

Существует приближенная феноменологическая связь между теплоемкостью  $C_V$  вещества при постоянном объеме и его изотермической сжимаемостью  $k_T$ , описываемая законом Грюнейзена:

$$\beta = \gamma \frac{C_V}{V} k_T, \quad k_T = - \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T,$$

где  $P$  — давление;  $\gamma$  — так называемая постоянная Грюнейзена, а также различные эмпирические соотношения, например

$$\alpha_{пл}^{1,17} = A,$$

где  $T_{пл}$  — температура плавления вещества;  $A = 7,24 \cdot 10^{-2}$  для веществ с металлическим характером связей,  $A = 11,5 \cdot 10^{-2}$  для щелочно-галогидных соединений.

В общем случае  $\alpha$  и  $\beta$  зависят от давления, температуры, химического состава, структуры тела и его фазового состояния. Монотонный характер зависимости  $\alpha(T)$  нарушается в точках фазового перехода, а также за счет сложения электронного, магнитного и решеточного вкладов в температурное расширение, которые в определенных температурных интервалах могут быть различными по знаку и сравнимыми по значению.

В табл. 10.1—10.12 приведены значения ТКЛР для индивидуальных веществ (элементов и неорганических соединений), а также для технических материалов в твердом состоянии. В табл. 10.13 приведены значения температурного коэффициента объемного расширения некоторых жидкостей и газов.

10.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Т а б л и ц а 10.1. Истинный температурный коэффициент линейного расширения элементов в кристаллическом состоянии  $\alpha$ ,  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [1]

| Элемент                           | Температура, К |                    |                    |       |                 |       |                  |      |      |                |      |      |             | Дополни-<br>тельная<br>литера-<br>тура |
|-----------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|-------|-----------------|-------|------------------|------|------|----------------|------|------|-------------|----------------------------------------|
|                                   | 5              | 10                 | 30                 | 50    | 100             | 200   | 300              | 400  | 500  | 600            | 800  | 1000 | 1200        |                                        |
| Ac                                | 0,0177         | —                  | —                  | —     | —               | —     | 14,9 (оценка)    | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Ag                                | —              | 0,111              | 3,36               | 7,94  | 14,7            | 17,8  | 18,9             | 19,5 | 20,2 | 21,0           | 23,1 | 25,6 | 28,1        |                                        |
| Al                                | —              | 0,051              | 1,04               | 3,62  | 12,3            | 20,2  | 23,3             | 24,5 | 26,2 | 28,1           | 32,6 | 37,8 | [2, 3]      |                                        |
| Am<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | 7,1              | —    | 9    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Ar<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | 5,1            | 46,2               | 287                | 457   | 667<br>(80 К)   | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| As<br>( $\alpha_{\parallel}$ )    | 0,073          | 0,514              | 10,7               | 18,7  | 31,25<br>(85 К) | —     | 43,44<br>(283 К) | —    | —    | —              | —    | —    | [2]         |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | 3,0<br>(279 К)   | —    | —    | —              | —    | —    | [2]         |                                        |
| Au                                | —              | —                  | —                  | —     | —               | 13,3  | 14,0             | 14,5 | 15,0 | 15,5           | 16,5 | 17,7 | 19,1        |                                        |
| B                                 | 0,026          | 0,228              | 4,22               | 7,65  | 11,5            | —     | 8 (273 К)        | 20,5 | 24,6 | 8,3<br>(658 К) | —    | —    | [2]         |                                        |
| Ba                                | 0,200          | 1,73               | 10,55              | 13,7  | 17,10<br>(85 К) | —     | 16,4             | 20,5 | 24,6 | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Be<br>( $\alpha_{\parallel}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | 0,66            | 5,25  | 9,20             | 11,5 | 12,9 | 14,0           | 15,9 | 17,6 | 19,5        |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | 1,48            | 7,89  | 12,4             | 14,9 | 16,9 | 18,3           | 20,2 | 21,4 | 23,4        |                                        |
| Bi<br>( $\alpha_{\parallel}$ )    | 0,26           | 2,07               | 13,1               | 16,0  | 16,85           | 17,1  | 17,2             | 17,4 | 17,5 | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | 0,026          | 0,20               | 3,20               | 6,84  | 9,96            | 11,2  | 11,7             | 11,8 | 11,9 | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Br<br>( $\alpha_a$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | 133,1 | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_b$ )                    | —              | —                  | —                  | —     | —               | 86,44 | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_c$ )                    | —              | —                  | —                  | —     | —               | 29,55 | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| C (алмаз)                         | —              | 4·10 <sup>-5</sup> | 8·10 <sup>-4</sup> | 0,004 | 0,05            | 0,45  | 1,0              | 1,80 | 2,53 | 3,09           | 3,83 | 4,32 | 4,83        |                                        |
| (графит) ( $\alpha_{\parallel}$ ) | —              | —                  | 3,8                | 8,7   | 17,6            | 24,9  | 26,7             | 27,5 | 28,1 | 28,5           | 28,9 | 29,2 | [3]         |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | [4]         |                                        |
| Ca                                | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Cd<br>( $\alpha_{\parallel}$ )    | 0,010          | 0,094              | 3,3                | 9,6   | 16,8            | 20,4  | 22,4             | 24,1 | 25,8 | 27,6           | 33,6 | —    | [2]         |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | 0,28           | 7,2                | 50,0               | 58,9  | 59,7            | 56,5  | 54,0             | 50,5 | 43,4 | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Ce<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\text{ср}}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Cl<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Co<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | 0,014          | 0,035              | 0,45               | 1,93  | 6,9             | 11,7  | 12,2             | 13,3 | 14,3 | 15,1           | 14,2 | 15,4 | [5]         |                                        |
| Cr<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Cs                                | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Cu<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | 0,009          | 0,021              | 1,00               | 3,87  | 10,5            | 15,2  | 16,7             | 17,3 | 17,9 | 18,6           | 20,1 | 21,8 | [3]         |                                        |
| Dy<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | [2, 58, 61] |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )          | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )              | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —                | —    | —    | —              | —    | —    | —           |                                        |
| Er<br>( $\alpha_{\text{ср}}$ )    | —              | —                  | —                  | —     | —               | —     | —</              |      |      |                |      |      |             |                                        |

| Элемент                 | Температура, К |                                 |        |       |        |                             |       |                            |      |      |          | Дополни-<br>тельная<br>литера-<br>тура |
|-------------------------|----------------|---------------------------------|--------|-------|--------|-----------------------------|-------|----------------------------|------|------|----------|----------------------------------------|
|                         | 5              | 10                              | 30     | 50    | 100    | 200                         | 300   | 400                        | 600  | 800  | 1000     | 1200                                   |
| Er ( $\alpha_{  }$ )    | —              | —                               | —      | —     | —      | —                           | 19,3  | ( $\alpha_{\perp} = 6,6$ ) | —    | —    | —        | [6]                                    |
| Eu ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | —                               | —      | —     | —      | —                           | 34,2  | 25,7                       | 19,4 | —    | —        | —                                      |
| Fe                      | 0,017          | 0,040                           | 0,22   | 1,00  | 5,09   | 9,96                        | 12,0  | 13,2                       | 15,5 | 16,5 | 14,7     | 22,5                                   |
| Fr                      | —              | —                               | —      | —     | —      | —                           | 102   | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| Ga ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | —                               | —      | —     | 15,7   | 18,8                        | 20,7  | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| Gd ( $\alpha_a$ )       | —              | —                               | —      | —     | —      | —                           | 16,2  | ( $\alpha_b = 11,1$ )      | —    | —    | —        | [3]                                    |
| Gd ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | —                               | —      | —     | 5      | 6                           | 6,3   | 6,6                        | 8,3  | 9,2  | 11,2     | [7]                                    |
| Ge                      | -2             | -3                              | —      | —     | 2,29   | 4,93                        | 5,82  | 6,28                       | 7,12 | 7,83 | 8,73     | [2]                                    |
| Ge                      | 0,0011         | 0,0045                          | -0,071 | 0,12  | —      | —                           | —     | —                          | —    | —    | (1100 K) | —                                      |
| H <sub>2</sub>          | —              | 4800 (в тройной точке, 13,96 K) | —      | —     | —      | —                           | 6,0   | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| Hf ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | —                               | —      | —     | —      | —                           | —     | 6,7                        | 7,11 | 7,54 | 7,98     | [2]                                    |
| Hf ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | —                               | —      | —     | 36,9   | 47,6                        | —     | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| Hg                      | —              | —                               | —      | —     | 42,9   | ( $\alpha_{\perp} = 34,0$ ) | —     | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| Ho                      | —              | —                               | -100   | —     | -70    | 9                           | 13    | 15,8                       | 17,8 | 19,9 | 22,2     | —                                      |
| Ho                      | —              | —                               | (60 K) | —     | —      | —                           | —     | —                          | —    | —    | (950 K)  | —                                      |
| I ( $\alpha_{\perp}$ )  | —              | —                               | —      | —     | 32     | —                           | 5     | —                          | 5,0  | 5,4  | 7,0      | —                                      |
| I                       | —              | —                               | —      | —     | —      | —                           | 88    | ( $\alpha_b = 95$ )        | —    | —    | (950 K)  | —                                      |
| In ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | —                               | —      | 53    | 70     | 83                          | 133,4 | -42,0                      | —    | —    | —        | —                                      |
| In ( $\alpha_a$ )       | -1,26          | 4,01                            | 23,0   | 23,0  | 18,0   | 5,9                         | -16,2 | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| In ( $\alpha_{  }$ )    | 0,99           | 0,94                            | 7,2    | 17,0  | 28,0   | 37,9                        | 53,9  | 79,5                       | 7,02 | 7,66 | 8,72     | —                                      |
| Ir ( $\alpha_{\perp}$ ) | —              | —                               | 0,93   | 2,0   | 4,11   | 6,09                        | 6,40  | 6,51                       | —    | —    | (1100 K) | —                                      |
| K                       | 0,95           | 6,01                            | 35,5   | 49,1  | 59,5   | 68,3                        | 79,6  | —                          | —    | —    | —        | [8]                                    |
| Kr                      | 8,1            | 57                              | 216    | 280   | 430    | —                           | —     | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| La                      | 0,16           | —                               | —      | —     | 3,3    | 4,4                         | 5,0   | 5,7                        | —    | 10,3 | 12,1     | —                                      |
| Li                      | —              | —                               | —      | —     | 22,5   | 39,0                        | 47,1  | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| Lu                      | 1,3            | 2,5                             | 7,4    | 11,5  | 17,5   | 18,1                        | 20,0  | 19,1                       | —    | —    | 18       | —                                      |
| Lu                      | 0,3            | 0,6                             | 2,0    | 3,5   | 7,3    | 6,2                         | 5,8   | 5                          | 9    | 12   | 12       | —                                      |
| Mg                      | 0,0075         | 0,03                            | 1,35   | 5,91  | 16,1   | 23,8                        | —     | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| Mg                      | 0,011          | 0,05                            | 1,35   | 5,34  | 15,0   | 22,3                        | —     | —                          | —    | —    | —        | —                                      |
| $\alpha$ -Mn            | —              | —                               | —      | —     | —      | —                           | 25,8  | 27,3                       | 31,0 | 35,0 | —        | —                                      |
| $\beta$ -Mn             | -0,14          | -0,28                           | -0,9   | -0,7  | 11,9   | 19,0                        | 22,8  | 25,8                       | 30,9 | 35,9 | —        | [3]                                    |
| $\gamma$ -Mr            | —              | —                               | —      | —     | 14,8   | 21,6                        | 25,6  | —                          | —    | —    | 43,2     | [3]                                    |
| Mo                      | 0,049          | 0,130                           | 1,40   | 4,01  | 8,10   | 12,3                        | 15,1  | —                          | —    | —    | 45,2     | [3]                                    |
| Mo                      | 0,007          | 0,02                            | 0,17   | 0,74  | 2,68   | 4,57                        | 5,27  | 5,45                       | 5,82 | 6,20 | (1400 K) | [3, 60]                                |
| N <sub>2</sub>          | 12,5           | 30                              | 550    | 692,0 | (44 K) | —                           | —     | —                          | —    | —    | (2400 K) | —                                      |
| Na                      | —              | —                               | —      | —     | 45,7   | 64,7                        | 71,5  | —                          | —    | —    | 10,39    | —                                      |
| Nb                      | 0,003*         | 0,04                            | 0,64   | 2,14  | 4,84   | 6,39                        | 7,10  | 7,30                       | 7,70 | 8,09 | (2400 K) | —                                      |

\* В сверхпроводящей фазе при 6 К.

Продолжение табл. 10.

| Элемент                          | Температура, К |        |                |               |       |                |                                   |                                |             |                 |       | Дополни-<br>тельная<br>литера-<br>тура |       |         |
|----------------------------------|----------------|--------|----------------|---------------|-------|----------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------|-----------------|-------|----------------------------------------|-------|---------|
|                                  | 5              | 10     | 30             | 50            | 100   | 200            | 300                               | 400                            | 500         | 600             | 800   |                                        | 1000  | 1200    |
| Nd ( $\alpha_{cp}$ )             | -2,0           | 2,9    | —              | —             | 7,9   | 7,0            | 7,0                               | 7,0                            | 7,2         | 7,6             | 8,9   | 13,4<br>(1100 K)                       | —     | —       |
| Ne ( $\alpha_{cp}$ )             | 46             | 337    | 1723<br>(23 K) | —             | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | —       |
| Ni ( $\alpha_{cp}$ )             | 0,02           | 0,05   | 0,26           | 1,64          | 6,61  | 11,4           | 13,0                              | 13,7                           | 14,9        | 16,9            | 16,7  | 18,2                                   | 20,3  | [3]     |
| Np ( $\alpha_{cp}$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 27,66                             | —                              | —           | 42,7<br>(700 K) | —     | —                                      | —     | —       |
| O <sub>2</sub> ( $\alpha_{cp}$ ) | 200<br>(21 K)  | —      | 535            | 870<br>(48 K) | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | —       |
| Os ( $\alpha_{  }$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 5,84                              | 6,17                           | 6,55        | 7,01            | 8,18  | —                                      | —     | —       |
| Os ( $\alpha_{\perp}$ )          | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 3,97                              | 4,16                           | 4,42        | 4,76            | 5,65  | —                                      | —     | —       |
| P (белый)                        | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 124,5                             | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | —       |
| P (красный)                      | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 66,5<br>(оценка)                  | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | —       |
| Pa ( $\alpha_{  }$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | 4,4 ( $\alpha_{\perp}$ = 21,4) | —           | —               | —     | -21,7 ( $\alpha_{\perp}$ = 85)         | —     | —       |
| Pb                               | 0,11<br>(4 K)  | 3,02   | 17,0           | 21,8          | 25,4  | 27,3           | 28,5                              | 29,63                          | 31,73       | 33,3<br>(550 K) | —     | —                                      | —     | —       |
| Pd                               | 0,5<br>(20 K)  | —      | 1,12           | 3,57          | 7,95  | 10,84          | 11,75                             | 12,48                          | 13,20       | 13,90           | 15,3  | 17,40<br>(1100 K)                      | —     | —       |
| Pm                               | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 9,0<br>(оценка)                   | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | —       |
| Po ( $\bar{\alpha}$ )            | —              | —      | —              | —             | —     | 23 (179÷300 K) | —                                 | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | —       |
| Pr                               | —              | —      | —              | —             | 6,5   | 5,6            | 5,0                               | 5,0                            | 5,2         | 5,7             | 7,3   | 7,8<br>(850 K)                         | —     | [2, 61] |
| Pt                               | 0,0155         | 0,071  | 1,43           | 3,80          | 6,77  | 8,55           | 8,99                              | 9,24                           | 9,46        | 9,70            | 10,2  | 15,6<br>(2100 K)                       | —     | —       |
| Pu ( $\alpha_{cp}$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | 39,5           | 48,7                              | 41,3<br>(440 K)                | —           | 8,61<br>(650 K) | —     | -16,3<br>(750 K)                       | —     | —       |
| Ra ( $\bar{\alpha}$ )            | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | 17,1                           | (300—600 K) | —               | —     | —                                      | —     | [5]     |
| Rb                               | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 90                                | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | —       |
| Re ( $\alpha_{cp}$ )             | 0,0053         | 0,0158 | 0,31           | 1,81          | 4,10  | 4,50           | 4,70                              | 3,95                           | —           | 3,83            | 3,58  | 3,33                                   | 3,13  | [9]     |
| Re ( $\alpha_{  }$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 6,25<br>( $\alpha_{\perp}$ = 7,0) | —                              | 293—1200 K  | —               | —     | —                                      | —     | [62]    |
| Rh                               | —              | —      | 0,40           | 1,70          | 4,99  | 7,57           | 8,50                              | 8,93                           | 9,38        | 9,84            | 10,80 | 12,40<br>(1100 K)                      | —     | [3]     |
| Ru ( $\alpha_{  }$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | 7,0            | 8,70                              | 9,09                           | 9,49        | 9,92            | 10,83 | 11,81                                  | 12,87 | —       |
| Ru ( $\alpha_{\perp}$ )          | —              | —      | —              | —             | —     | 4,8            | 5,8                               | 5,94                           | 6,16        | 6,45            | 7,15  | 7,95                                   | 8,80  | —       |
| S (ромб.)                        | —              | —      | —              | —             | 42    | 57             | 64,1                              | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [2]     |
| S (моноклин.)                    | —              | —      | —              | —             | —     | —              | 80                                | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [2]     |
| Sb ( $\alpha_{  }$ )             | —              | 0,04   | 5,19           | 13,17         | 15,8  | 16,15          | 16,2                              | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [4]     |
| Sb ( $\alpha_{\perp}$ )          | —              | -0,01  | 0,47           | 2,31          | 5,99  | 7,72           | 8,31                              | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [4]     |
| Sc ( $\alpha_{cp}$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [4]     |
| Sc ( $\alpha_{  }$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [4]     |
| Sc ( $\alpha_{\perp}$ )          | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [4]     |
| Se (моноклин.)                   | —              | -1,75  | -16,1          | -19,9         | -13,8 | -13,3          | -13,4                             | 8,07                           | 8,53        | 8,99            | 9,93  | 16,1                                   | 17,3  | [11]    |
| Se ( $\alpha_{  }$ )             | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | 11,8                                   | 15,4  | [11]    |
| Se ( $\alpha_{\perp}$ )          | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | 11,9                                   | 10,9  | [11]    |
| Se (моноклин.)                   | —              | —      | —              | —             | —     | —              | —                                 | —                              | —           | —               | —     | —                                      | —     | [12]    |





Продолжение табл. 10.1

| Элемент              | Температура, К |                 |       |                |       |                  |      |      |      |                 |       |                        |            | Дополни-<br>тельная<br>литера-<br>тура |
|----------------------|----------------|-----------------|-------|----------------|-------|------------------|------|------|------|-----------------|-------|------------------------|------------|----------------------------------------|
|                      | 5              | 10              | 30    | 50             | 100   | 200              | 300  | 400  | 500  | 600             | 800   | 1000                   | 1200       |                                        |
| Tm ( $\alpha_{  }$ ) | —              | —               | —     | —              | —     | —                | —    | 20   | 20   | 20              | 20    | 22<br>(1050 K)         | —          |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ ) | —              | —               | —     | —              | —     | —                | —    | 12   | 12   | 12              | 12    | 14<br>(1050 K)         | —          |                                        |
| ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | —0,7            | 2,2   | —1,3<br>(56 K) | 3,0   | 5,0              | 5,8  | —    | —    | —               | —     | —                      | —          |                                        |
| U ( $\alpha_n$ )     | —              | —136<br>(36 K)  | —     | 23,9<br>(90 K) | —     | 25,7             | 26   | 26,2 | 30,2 | 35,1            | 46,6  | 54,7<br>(900 K)        | —          |                                        |
| ( $\alpha_b$ )       | —              | —28,2<br>(36 K) | —     | 2,9<br>(90 K)  | —     | 1,6              | 0,4  | —0,8 | —2,5 | —5,6            | —17,2 | —25<br>(900 K)         | —          |                                        |
| ( $\alpha_c$ )       | —              | 52,1<br>(36 K)  | —     | 10,9<br>(90 K) | —     | 15,0             | 18,0 | 21,6 | 25,8 | 30,7            | 41,6  | 47,2<br>(900 K)        | —          |                                        |
| V                    | 0,025<br>(6 K) | 0,045           | 0,35  | 1,13           | 3,95  | 7,49             | 7,84 | 8,5  | 9,3  | 9,8             | 10,7  | 11,7                   | 12,7       |                                        |
| W                    | 0,00044        | 0,007           | 0,2   | 0,8            | 2,3   | 4,1              | 4,6  | 4,6  | 4,6  | 4,7             | 4,8   | 4,9<br>8,8<br>(3200 K) | 5,1<br>[3] |                                        |
| Xe                   | 8,7            | 40              | 140,3 | 183,0          | 263,0 | 420,7<br>(155 K) | —    | —    | —    | —               | —     | —                      | —          |                                        |
| Yb                   | 0,17           | 1,23            | —     | —              | —     | —                | —    | 25,7 | 27,0 | 29,1            | 33,1  | 33,7<br>(850 K)        | —          |                                        |
| Yt ( $\alpha_{  }$ ) | —              | 0,1             | 2,1   | 6,2            | 13,7  | 18,4             | 19,2 | 19,4 | 19,6 | 19,7            | 20,1  | 22,3<br>(1050 K)       | —          |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ ) | —              | —               | 0,3   | 0,8            | 2,9   | 4,3              | 4,6  | 5,0  | 5,4  | 5,6             | 6,7   | 10,1<br>(1050 K)       | —          |                                        |
| Zn ( $\alpha_{  }$ ) | 0,05           | 0,76            | 33,4  | 54,1           | 65,4  | 65,6             | 63,5 | 61,0 | 58,9 | 50,3<br>(650 K) | —     | —                      | —          |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ ) | —0,001         | —0,06           | —4,3  | —3,0           | 4,1   | 10,4             | 13,2 | 15,7 | 17,7 | 27,9<br>(650 K) | —     | —                      | —          |                                        |
| Zr ( $\alpha_{  }$ ) | —              | —               | —     | —              | —     | 6,55             | 7,36 | 8,20 | 9,07 | 9,97            | 11,84 | 14,87<br>(1100 K)      | —          |                                        |
| ( $\alpha_{\perp}$ ) | —              | —               | —     | —              | —     | 4,87             | 4,99 | 5,09 | 5,16 | 5,20            | 5,19  | 4,94<br>(1100 K)       | —          |                                        |
| ( $\alpha_{cp}$ )    | —              | 0,02            | 0,75  | 1,90           | 4,09  | —                | —    | —    | —    | —               | —     | —                      | —          |                                        |

Таблица 10.2. Температурный коэффициент линейного расширения индивидуальных соединений. Приведены значения истинного ТКЛР  $\alpha$  (при данной температуре) или среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$  (в интервале  $\Delta T$ )

| Вещество                                            | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература | Вещество                                                                                                                        | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература |
|-----------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------|
| AgBr                                                | 300              | 34,3                                   | [16]       | BeO                                                                                                                             | 300—373          | 5,42                                   | [34]       |
| AgCl                                                | 300              | 30,1                                   | [13]       |                                                                                                                                 | 300—673          | 7,08                                   | [34]       |
|                                                     | 473              | 34,54                                  | [13]       | Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> ( $\alpha_{  }$ )                                                                               | 50               | 13                                     | [19]       |
|                                                     | 698              | 69,99                                  | [13]       |                                                                                                                                 | 100              | 18                                     | [19]       |
| AgGaSe <sub>2</sub>                                 | 300              | 7,1                                    | [33]       |                                                                                                                                 | 200              | 20                                     | [19]       |
| $\alpha$ -, $\beta$ -AgI                            | 100              | -0,3                                   | [1]        |                                                                                                                                 | 300              | 21,3                                   | [19]       |
|                                                     | 200              | -0,9                                   | [1]        |                                                                                                                                 | 400              | 22,6                                   | [19]       |
|                                                     | 300              | -1,5                                   | [1]        |                                                                                                                                 | 600              | 24                                     | [19]       |
|                                                     | 400              | -3,2                                   | [1]        | ( $\alpha_{\perp}$ )                                                                                                            | 30               | 5                                      | [19]       |
|                                                     | 600              | 36,83                                  | [1]        |                                                                                                                                 | 50               | 8                                      | [19]       |
|                                                     | 750              | 44,6                                   | [1]        |                                                                                                                                 | 100              | 11                                     | [19]       |
| $\gamma$ -AgI                                       | 120—300          | -1,6                                   | [1]        |                                                                                                                                 | 200              | 12                                     | [19]       |
| AgInSe <sub>2</sub>                                 | 300              | 1,9                                    | [33]       |                                                                                                                                 | 300              | 12,9                                   | [19]       |
| AgInTe <sub>2</sub>                                 | 300              | 4,3                                    | [33]       |                                                                                                                                 | 400              | 15                                     | [19]       |
| AlAs                                                | 300              | 3,5                                    | [1]        |                                                                                                                                 | 600              | 17                                     | [19]       |
|                                                     | 400              | 4,1                                    | [1]        | CBr <sub>4</sub>                                                                                                                | 200              | 1,03                                   | [3]        |
| AlN                                                 | 288—1113         | 5,2                                    | [1]        |                                                                                                                                 | 300              | 1,50                                   | [3]        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( $\alpha_{  }$ )    | 300—873          | 4,8                                    | [22]       | (CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> COOH <sub>3</sub> )BeF <sub>4</sub><br>(триглицинфторобериллат)<br>( $\alpha_{100}$ )          | 100              | 15                                     | [3]        |
|                                                     | 300              | 6,7                                    | [31]       |                                                                                                                                 | 200              | 0                                      | [3]        |
|                                                     | 400              | 6,46                                   | [31]       |                                                                                                                                 | 300              | 20                                     | [3]        |
|                                                     | 600              | 7,38                                   | [31]       | ( $\alpha_{010}$ )                                                                                                              | 100              | 48                                     | [3]        |
|                                                     | 800              | 7,99                                   | [31]       |                                                                                                                                 | 200              | 64                                     | [3]        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( $\alpha_{\perp}$ ) | 300              | 5,0                                    | [31]       | ( $\alpha_{001}$ )                                                                                                              | 300              | 50                                     | [3]        |
|                                                     | 400              | 5,82                                   | [31]       |                                                                                                                                 | 100              | 10                                     | [3]        |
|                                                     | 600              | 6,68                                   | [31]       |                                                                                                                                 | 200              | 16                                     | [3]        |
|                                                     | 800              | 7,23                                   | [31]       |                                                                                                                                 | 300              | 10                                     | [3]        |
| AlSb                                                | 30               | -0,90                                  | [1]        | (CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> COOH <sub>3</sub> )H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>(триглицинсульфат)<br>( $\alpha_{100}$ )  | 100              | 5                                      | [3]        |
|                                                     | 50               | -0,94                                  | [1]        |                                                                                                                                 | 200              | 3                                      | [3]        |
|                                                     | 100              | 0,49                                   | [1]        |                                                                                                                                 | 300              | -30                                    | [3]        |
|                                                     | 200              | 3,36                                   | [1]        | ( $\alpha_{010}$ )                                                                                                              | 100              | 40                                     | [3]        |
|                                                     | 300              | 4,08                                   | [1]        |                                                                                                                                 | 200              | 41                                     | [3]        |
|                                                     | 300—1323         | 4,88                                   | [1]        | ( $\alpha_{001}$ )                                                                                                              | 300              | -10,5                                  | [3]        |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | 300—1273         | 8,4                                    | [16]       |                                                                                                                                 | 100              | 10                                     | [3]        |
| As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                      | 300—438          | 24,62                                  | [13]       |                                                                                                                                 | 200              | 16                                     | [3]        |
| B <sub>4</sub> C                                    | 300—1073         | 4,5                                    | [34]       | (CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> COOH <sub>3</sub> )H <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub><br>(триглицинселенат)<br>( $\alpha_{100}$ ) | 300              | 8,5                                    | [3]        |
| BN                                                  | 300              | 7,5                                    | [29]       |                                                                                                                                 | 100              | 0                                      | [3]        |
| BP                                                  | 400              | 4,0                                    | [35]       |                                                                                                                                 | 300              | -30                                    | [3]        |
|                                                     | 600              | 5,0                                    | [35]       | ( $\alpha_{010}$ )                                                                                                              | 100              | 12                                     | [3]        |
|                                                     | 800              | 6,2                                    | [35]       |                                                                                                                                 | 200              | 35                                     | [3]        |
| BaB <sub>6</sub>                                    | 300—1073         | 6,8                                    | [16]       | ( $\alpha_{001}$ )                                                                                                              | 300              | -30                                    | [3]        |
| BaF <sub>2</sub>                                    | 30               | 0,7                                    | [1,3]      |                                                                                                                                 | 100              | 10                                     | [3]        |
|                                                     | 50               | 2,9                                    | [1,3]      |                                                                                                                                 | 200              | 16                                     | [3]        |
|                                                     | 100              | 9,9                                    | [1,3]      |                                                                                                                                 | 300              | 8,5                                    | [3]        |
|                                                     | 200              | 16,1                                   | [1,3]      | (CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> COOH <sub>3</sub> )H <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub><br>(триглицинселенат)<br>( $\alpha_{100}$ ) | 100              | 5                                      | [3]        |
|                                                     | 300              | 18,4                                   | [1,3]      |                                                                                                                                 | 200              | 0                                      | [3]        |
| Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                   | 3—77             | 3,3                                    | [16]       |                                                                                                                                 | 300              | -30                                    | [3]        |
|                                                     | 77—200           | 6,7                                    | [16]       | ( $\alpha_{010}$ )                                                                                                              | 100              | 12                                     | [3]        |
|                                                     | 300              | 15,2                                   | [16]       |                                                                                                                                 | 200              | 35                                     | [3]        |
| BaNaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub>                 | 300              | 10,9                                   | [36]       | ( $\alpha_{001}$ )                                                                                                              | 300              | -30                                    | [3]        |
| BaSi <sub>2</sub>                                   | 300—1373         | 8,4                                    | [16]       |                                                                                                                                 | 100              | 10                                     | [3]        |
| BaSrNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ( $\alpha_a$ )   | 300              | 10                                     | [36]       |                                                                                                                                 | 200              | 16                                     | [3]        |
| ( $\alpha_c$ )                                      | 200—900          | 9                                      | [36]       |                                                                                                                                 | 300              | 95                                     | [3]        |
| BaTiO <sub>3</sub> (ромбоэдр.)                      | 113—174          | 8,8                                    | [17]       | CaB <sub>6</sub>                                                                                                                | 300              | 6,5                                    | [38]       |
| (куб.)                                              | 200              | 6,5                                    | [18]       | CaCO <sub>3</sub> ( $\alpha_{  }$ )                                                                                             | 200              | 22,4                                   | [3]        |
|                                                     | 300              | 7,5                                    | [17]       |                                                                                                                                 | 300              | 24,4                                   | [13]       |
|                                                     | 400              | 8,6                                    | [18]       |                                                                                                                                 | 323              | 26,6                                   | [3]        |
|                                                     | 773              | 12,3                                   | [17]       | ( $\alpha_{\perp}$ )                                                                                                            | 200              | 5,41                                   | [13]       |
| BaTiO <sub>3</sub> (тетр.)                          | 300              | 11,4                                   | [18]       |                                                                                                                                 | 300              | 5,68                                   | [3]        |
|                                                     | 293—393          | 3,5                                    | [17]       |                                                                                                                                 | 323              | 5,2                                    | [13]       |
| (орторомб.)                                         | 174—277          | 11,4                                   | [18]       |                                                                                                                                 | 638              | -3,8                                   | [3]        |
| Be <sub>2</sub> C                                   | 300              | 5,6                                    | [16]       | CaCl <sub>2</sub>                                                                                                               | 300—463          | 22,3                                   | [16]       |
|                                                     | 300—473          | 7,7                                    | [16]       |                                                                                                                                 |                  |                                        |            |
|                                                     | 300—673          | 9,5                                    | [16]       |                                                                                                                                 |                  |                                        |            |

| Вещество                      | $T, \Delta T, K$                                                             | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-6} K^{-1}$                                          | Литература                                                                     | Вещество                  | $T, \Delta T, K$                            | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-6} K^{-1}$ | Литература                                           |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $CaF_2$                       | 30<br>50<br>100<br>200<br>300<br>320                                         | 0,3<br>1,6<br>7,52<br>15,6<br>18,80<br>19,09                                         | [1, 3]<br>[1, 3]<br>[1, 3]<br>[1, 3]<br>[1, 3]<br>[1, 3]                       | $CmO_2$                   | 300<br>400<br>600<br>773—1073               | 8,1<br>8,1<br>8,1<br>6,6                    | [31]<br>[31]<br>[31]<br>[31]                         |
| $CaMoO_4$ ( $\alpha_a$ )      | 300                                                                          | 19,4                                                                                 | [20]                                                                           | $CoF_2$ ( $\alpha_{  }$ ) | 300                                         | 3,6                                         | [28]                                                 |
| $CaO$ ( $\alpha_c$ )          | 300<br>300—573<br>300—673                                                    | 25,5<br>10,2<br>13,2                                                                 | [29]<br>[31]<br>[37]                                                           | $CoSb$                    | 300<br>100<br>200<br>300                    | 10,7<br>8,3<br>11,4<br>12,5                 | [28]<br>[31]<br>[3]<br>[3]                           |
| $Ca_3(PO_4)_2$                | 300                                                                          | 9                                                                                    | [20]                                                                           | $CoSi$                    | 300—1073                                    | 10,6                                        | [16]                                                 |
| $CaTiO_3$                     | 300                                                                          | 10                                                                                   | [24]                                                                           | $Cr_3C_2$                 | 300—373<br>300—873                          | 8,8<br>8,0                                  | [27]<br>[34]                                         |
| $Ca_3(VO_4)_2$ ( $\alpha_a$ ) | 300                                                                          | 5,5                                                                                  | [20]                                                                           | $CrN$                     | 300—1073                                    | 2,3                                         | [34]                                                 |
| $CaWO_4$ ( $\alpha_a$ )       | 80—300<br>300<br>400<br>773—1073<br>80—300<br>300<br>400<br>773—1073         | 7,9<br>11,2<br>11,2<br>13,8<br>12,7<br>18,7<br>18,7<br>22,0                          | [17]<br>[20]<br>[17]<br>[20]<br>[17]<br>[20]<br>[17]<br>[20]                   | $CrO_2$ ( $\alpha_{  }$ ) | 300                                         | —10,3                                       | [31]                                                 |
| $(\alpha_c)$                  | 300<br>400<br>773—1073<br>80—300<br>300<br>400<br>773—1073                   | 16,2<br>12,3<br>12,3<br>20,0<br>28,7<br>38,6<br>43,1                                 | [31]<br>[31]<br>[34]<br>[25]<br>[3]<br>[13]<br>[13]                            | $CrS$                     | 300—1300                                    | 52,24                                       | [13]                                                 |
| $Cd_3As_2$                    | 300                                                                          | 11,4                                                                                 | [3]                                                                            | $Cr_2S_3$                 | 300                                         | 61                                          | [3, 13]                                              |
| $CdBr_2$                      | 300—1173                                                                     | 8,7                                                                                  | [16]                                                                           | $CsBr$                    | 30<br>50<br>100<br>200<br>300<br>400<br>600 | 44,8<br>48,6<br>3,2<br>9,5<br>6,5           | [16]<br>[17]<br>[25]<br>[25]<br>[16]<br>[13]<br>[13] |
| $CdF_2$                       | 300                                                                          | 27,0                                                                                 | [13]                                                                           | $CuBr$                    | 293—423                                     | 19                                          | [13]                                                 |
| $CdGeAs_2$                    | 300                                                                          | 11,4                                                                                 | [3]                                                                            | $CuCl$                    | 293—413                                     | 10                                          | [13]                                                 |
| $CdGeP_2$                     | 300                                                                          | 3,2                                                                                  | [3]                                                                            | $CuGaSe_2$                | 300                                         | 5,4                                         | [25]                                                 |
| $(стекл.)$                    | 300                                                                          | 5,2                                                                                  | [3]                                                                            | $CuGaTe_2$                | 300                                         | 6,9                                         | [33]                                                 |
| $CdI_2$                       | 323                                                                          | 29,1                                                                                 | [16]                                                                           | $CuGeS_3$                 | 300                                         | 7,8                                         | [25]                                                 |
| $Cd_2O_3$                     | 300—373<br>300—1073                                                          | 10,5<br>10,0                                                                         | [37]<br>[37]                                                                   | $CuGeSe_3$                | 300                                         | 8,4                                         | [25]                                                 |
| $Cd_3P_2$                     | 300                                                                          | 9,63                                                                                 | [3]                                                                            | $CuI$                     | 300—875                                     | 25,2                                        | [1]                                                  |
| $CdS$ ( $\alpha_{cp}$ )       | 50                                                                           | —2,4                                                                                 | [1, 13]                                                                        | $CuInSe_2$                | 300                                         | 6,6                                         | [25]                                                 |
| $(\alpha_{  })$               | 77—298                                                                       | 2,1                                                                                  | [1]                                                                            | $CuInTe_2$                | 300                                         | 7,1                                         | [25]                                                 |
| $(\alpha_{\perp})$            | 300<br>600<br>800<br>77—298<br>300<br>600<br>800<br>77—298                   | 4,1<br>4,2<br>4,8<br>4,0<br>6,5<br>6,6<br>7,3<br>2,45                                | [13]<br>[1]<br>[13]<br>[1, 13]<br>[1]<br>[13]<br>[1]<br>[1, 13]                | $Cu_3SbSe_4$              | 300                                         | 7,1                                         | [25]                                                 |
| $CdSe$ ( $\alpha_{  }$ )      | 77—298                                                                       | 2,45                                                                                 | [1, 13]                                                                        | $Cu_2SnSe_3$              | 300                                         | 8,9                                         | [25]                                                 |
| $(\alpha_{\perp})$            | 77—298                                                                       | 4,4                                                                                  | [1, 13]                                                                        | $Cu_2SnS_3$               | 300                                         | 7,8                                         | [25]                                                 |
| $CdSnAs_2$                    | 300                                                                          | 4,7                                                                                  | [25]                                                                           | $DyBi$                    | 300                                         | 10,2                                        | [3]                                                  |
| $CdTe$                        | 30<br>50<br>100<br>200<br>300<br>400<br>600<br>800<br>200<br>300<br>300—1073 | —2,75<br>—1,80<br>1,38<br>4,09<br>4,96<br>5,10<br>5,45<br>5,8<br>1,66<br>2,35<br>7,3 | [1]<br>[13]<br>[1]<br>[13]<br>[1]<br>[13]<br>[1]<br>[13]<br>[3]<br>[3]<br>[16] | $Dy_2O_3$                 | 300—1113                                    | 8,3                                         | [34]                                                 |
| $CdTi_2Te_4$                  | 200<br>300                                                                   | 1,66<br>2,35                                                                         | [3]<br>[3]                                                                     | $ErBi$                    | 300                                         | 10,8                                        | [3]                                                  |
| $CeB_6$                       | 300—1073                                                                     | 7,3                                                                                  | [16]                                                                           | $Er_2O_3$                 | 373—573                                     | 5,7                                         | [31]                                                 |
| $CeO_2$                       | 300<br>373—773                                                               | 8,5<br>8,6                                                                           | [25]<br>[25]                                                                   | $Eu_2O_3$                 | 300—373                                     | 10,4                                        | [31]                                                 |
| $Ce_2S_3$ ( $\alpha_{  }$ )   | 300                                                                          | 13,2                                                                                 | [25]                                                                           | $EuB_6$                   | 300                                         | 6,9                                         | [38]                                                 |
| $(\alpha_{\perp})$            | 300                                                                          | 10,5                                                                                 | [25]                                                                           | $EuS$                     | 300                                         | 14,6                                        | [25]                                                 |
| $Ce_2Se_3$ ( $\alpha_{cp}$ )  | 300                                                                          | 12,6                                                                                 | [25]                                                                           | $EuSe$                    | 300                                         | 18,6                                        | [25]                                                 |
|                               |                                                                              |                                                                                      |                                                                                | $FeF_2$ ( $\alpha_{  }$ ) | 300                                         | —0,4                                        | [28]                                                 |
|                               |                                                                              |                                                                                      |                                                                                | $(\alpha_{\perp})$        | 300                                         | 16,8                                        | [28]                                                 |
|                               |                                                                              |                                                                                      |                                                                                | $Fe_4N$                   | 300                                         | 7,9                                         | [16]                                                 |
|                               |                                                                              |                                                                                      |                                                                                | $FeS$                     | 293—1273                                    | 22,1                                        | [34]                                                 |
|                               |                                                                              |                                                                                      |                                                                                | $FeS_2$                   | 320                                         | 8,9                                         | [16]                                                 |
|                               |                                                                              |                                                                                      |                                                                                | $Fe_3Se_4$                | 30<br>50<br>100<br>200<br>300               | —0,30<br>—2,15<br>—3,80<br>—0,90<br>1,85    | [3]<br>[3]<br>[3]<br>[3]<br>[3]                      |

| Вещество              | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-6} K^{-1}$ | Литература | Вещество                            | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-6} K^{-1}$ | Литература |
|-----------------------|------------------|---------------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------------|---------------------------------------------|------------|
| $Fe_3Si$              | 293—1273         | 14,4                                        | [34]       | $HgBr (\alpha_{010})$               | 100              | 45,5                                        | [3]        |
| $Fe_5Si_3$            | 70               | 0,5                                         | [3]        |                                     | 200              | 42,8                                        | [3]        |
|                       | 100              | 4,3                                         | [3]        |                                     | 300              | 45,0                                        | [3]        |
|                       | 200              | 8,3                                         | [3]        | $HgBr (\alpha_{001})$               | 100              | 4,8                                         | [3]        |
|                       | 300              | 8,2                                         | [3]        |                                     | 200              | 3,2                                         | [3]        |
| $FeTe_2 (\alpha_a)$   | 300              | 21                                          | [1]        |                                     | 300              | 3,7                                         | [3]        |
|                       | 400              | 24                                          | [1]        | $HgCl (\alpha_{100}, \alpha_{010})$ | 100              | 44,1                                        | [3]        |
|                       | 600              | 38                                          | [1]        |                                     | 200              | 43,0                                        | [3]        |
|                       | 800              | 61                                          | [1]        |                                     | 300              | 47,0                                        | [3]        |
| $FeTe_2 (\alpha_b)$   | 300              | 46                                          | [1]        |                                     | 100              | 1,6                                         | [3]        |
|                       | 400              | 48                                          | [1]        |                                     |                  |                                             |            |
| $FeTe_2 (\alpha_b)$   | 600              | 58                                          | [1]        |                                     | 200              | 0,3                                         | [3]        |
|                       | 800              | 80                                          | [1]        |                                     | 300              | 1,4                                         | [3]        |
| $(\alpha_c)$          | 300              | 3                                           | [1]        | $HgSe$                              | 300              | 1,48                                        | [1]        |
|                       | 400              | 7                                           | [1]        |                                     | 400              | 1,64                                        | [1]        |
|                       | 600              | 15                                          | [1]        |                                     | 500              | 1,66                                        | [1]        |
|                       | 800              | 22                                          | [1]        | $HgTe$                              | 300              | 4,80                                        | [1]        |
| $GaAs$                | 10               | 0,0045                                      | [1]        |                                     | 400              | 4,80                                        | [1]        |
|                       | 30               | -0,177                                      | [1]        | $HoBi$                              | 300              | 10,5                                        | [1]        |
|                       | 50               | -0,15                                       | [1]        | $Ho_2O_3$                           | 300—1073         | 8,44                                        | [37]       |
|                       | 100              | 2,05                                        | [1]        | $InAs$                              | 10               | -0,058                                      | [1]        |
|                       | 200              | 4,93                                        | [1]        |                                     | 30               | -0,86                                       | [1]        |
|                       | 300              | 5,82                                        | [1]        |                                     | 50               | -0,4                                        | [1]        |
|                       | 400              | 6,23                                        | [1]        |                                     | 100              | 2,05                                        | [1]        |
|                       | 600              | 6,98                                        | [1]        |                                     | 200              | 3,80                                        | [1]        |
|                       | 800              | 7,4                                         | [1]        |                                     | 300              | 4,41                                        | [1]        |
| $GaP$                 | 300              | 5,6                                         | [1]        |                                     | 400              | 5,07                                        | [1]        |
|                       | 400              | 5,7                                         | [1]        |                                     | 600              | 5,67                                        | [1]        |
|                       | 800              | 6,1                                         | [1]        |                                     | 800              | 5,92                                        | [1]        |
| $GaSb$                | 10               | -0,026                                      | [1]        | $In_2O_3$                           | 300—1273         | 7,2                                         | [31]       |
|                       | 30               | -0,34                                       | [1]        | $InP$                               | 300              | 4,3                                         | [1]        |
|                       | 50               | 0,0                                         | [1]        |                                     | 400              | 4,5                                         | [1]        |
|                       | 100              | 2,81                                        | [1]        |                                     | 600              | 4,9                                         | [1]        |
|                       | 200              | 5,81                                        | [1]        |                                     | 800              | 5,9                                         | [1]        |
|                       | 300              | 6,36                                        | [1]        | $InS (\alpha_{  })$                 | 150              | 7,05                                        | [3]        |
|                       | 400              | 6,40                                        | [1]        |                                     | 200              | 8,76                                        | [3]        |
|                       | 600              | 6,40                                        | [1]        |                                     | 300              | 10,8                                        | [3]        |
| $Ga_2Se_3$            | 30               | 1,70                                        | [1]        | $InS (\alpha_{\perp})$              | 150              | 9,48                                        | [3]        |
|                       | 50               | 3,02                                        | [1]        |                                     | 200              | 11,5                                        | [3]        |
|                       | 100              | 5,83                                        | [1]        |                                     | 300              | 14,2                                        | [3]        |
|                       | 200              | 8,14                                        | [1]        | $InSb$                              | 10               | -0,24                                       | [1]        |
|                       | 300              | 8,99                                        | [1]        |                                     | 30               | -1,5                                        | [21]       |
|                       | 400              | 9,30                                        | [1]        |                                     | 50               | -0,4                                        | [1]        |
| $Ga_2Te_3$            | 77               | 9,2                                         | [1]        |                                     | 100              | 2,60                                        | [21]       |
|                       | 300              | 8,3                                         | [1]        |                                     | 200              | 4,67                                        | [1]        |
|                       | 300—1060         | 11,86                                       | [1]        |                                     | 300              | 5,15                                        | [21]       |
| $GdB_6$               | 300              | 8,7                                         | [38]       |                                     | 400              | 5,3                                         | [1]        |
| $GdBi$                | 300              | 9,2                                         | [3]        |                                     | 473              | 5,4                                         | [21]       |
| $Gd_2O_3$             | 300—1073         | 10,0                                        | [31]       | $InSe (\alpha_{  })$                | 150              | 8,94                                        | [3]        |
| $GeO_2 (\alpha_{  })$ | 300              | 2,0                                         | [28]       |                                     | 200              | 10,8                                        | [3]        |
| $(\alpha_{\perp})$    | 300              | 6,0                                         | [28]       |                                     | 300              | 12,4                                        | [3]        |
| $H_2O$                | 23               | -6,1                                        | [16]       |                                     | 150              | 11,25                                       | [3]        |
|                       | 83               | 3,3                                         | [16]       |                                     | 200              | 13,7                                        | [3]        |
|                       | 193              | 39,2                                        | [16]       |                                     | 300              | 16,0                                        | [3]        |
|                       | 273              | 52,7                                        | [16]       | $InTe (\alpha_{  })$                | 150              | 8,82                                        | [3]        |
| $HfB_2$               | 300—1273         | 6,3                                         | [31]       |                                     | 200              | 11,25                                       | [3]        |
| $HfC$                 | 300—473          | 6,0                                         | [27]       |                                     | 300              | 14,0                                        | [3]        |
|                       | 300—873          | 6,5                                         | [27]       |                                     | 150              | 10,75                                       | [3]        |
| $HfN$                 | 300—1373         | 6,9                                         | [34]       |                                     | 200              | 13,55                                       | [3]        |
| $HfO_2$               | 530—1120         | 6,84                                        | [34]       |                                     | 300              | 16,42                                       | [3]        |
| $HgBr (\alpha_{100})$ | 100              | 53,4                                        | [3]        | $In_2Te_3$                          | 30               | 2,97                                        | [1]        |
|                       | 200              | 42,8                                        | [3]        |                                     | 50               | 5,32                                        | [1]        |
|                       | 300              | 45,0                                        | [3]        |                                     |                  |                                             |            |

| Вещество                                                                             | T, ΔT, К | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> | Литература | Вещество                                                      | T, ΔT, К | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> | Литература |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|------------|
| In <sub>2</sub> Tc <sub>3</sub>                                                      | 100      | 8,03                                                        | [1]        | LiNbO <sub>3</sub> ( $\alpha_{\perp}$ )                       | 100      | 1,9                                                         | [24]       |
|                                                                                      | 200      | 9,94                                                        | [1]        |                                                               | 200      | 8,5                                                         | [24]       |
| IrO <sub>2</sub> ( $\alpha_{\parallel}$ )                                            | 300      | 10,10                                                       | [1]        |                                                               | 300      | 15,7                                                        | [24]       |
| ( $\alpha_{\perp}$ )                                                                 | 300      | 1,7                                                         | [28]       |                                                               | 400      | 17,5                                                        | [24]       |
| KBr                                                                                  | 30       | 3,8                                                         | [28]       | LiTaO <sub>3</sub> ( $\alpha_a$ )                             | 600      | 19,0                                                        | [24]       |
|                                                                                      | 50       | 6,83                                                        | [3]        | ( $\alpha_c$ )                                                | 300      | 12,0                                                        | [24]       |
|                                                                                      | 100      | 16,7                                                        | [13]       | Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                | 300      | 4,2                                                         | [24]       |
|                                                                                      | 200      | 29,3                                                        | [3]        | MgF <sub>2</sub> ( $\alpha_{\parallel}$ )                     | 300      | 7,8                                                         | [31]       |
|                                                                                      | 320—953  | 34,6                                                        | [13]       |                                                               | 300      | 13,42                                                       | [1]        |
| KCl                                                                                  | 30       | 38                                                          | [13]       |                                                               | 400      | 14,49                                                       | [1]        |
|                                                                                      | 50       | 3,11                                                        | [3]        |                                                               | 600      | 16,86                                                       | [1]        |
|                                                                                      | 100      | 11,4                                                        | [22]       | ( $\alpha_{\perp}$ )                                          | 800      | 20,24                                                       | [1]        |
|                                                                                      | 200      | 25,4                                                        | [3]        |                                                               | 300      | 9,44                                                        | [1]        |
|                                                                                      | 300      | 33,5                                                        | [22]       |                                                               | 400      | 10,17                                                       | [1]        |
|                                                                                      | 400      | 37,0                                                        | [3]        |                                                               | 600      | 12,59                                                       | [1]        |
|                                                                                      | 600      | 38,8                                                        | [22]       |                                                               | 800      | 15,77                                                       | [1]        |
|                                                                                      | 800      | 45,4                                                        | [3]        | MgO                                                           | 293—373  | 11,7                                                        | [31]       |
| KF                                                                                   | 200—300  | 52,45                                                       | [22]       | Mg <sub>2</sub> Si                                            | 293—873  | 12,9                                                        | [37]       |
| KH                                                                                   | 300—352  | 45,0                                                        | [16]       |                                                               | 30       | 0,08                                                        | [1]        |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (КДР, дигидрофосфат калия)                           | 300—673  | 33,3                                                        | [16]       |                                                               | 50       | 0,74                                                        | [1]        |
| ( $\alpha_{\parallel}$ )                                                             |          | 36                                                          | [39]       |                                                               | 100      | 5,49                                                        | [1]        |
|                                                                                      | 120      | 34,3                                                        | [3]        | Mg <sub>2</sub> Sn                                            | 200      | 12,31                                                       | [1]        |
| ( $\alpha_{\perp}$ )                                                                 | 200      | 34,3                                                        | [3]        |                                                               | 300      | 13,96                                                       | [1]        |
|                                                                                      | 300      | 34,3                                                        | [3]        |                                                               | 30       | 0,85                                                        | [1]        |
|                                                                                      | 120      | 21,6                                                        | [3]        |                                                               | 50       | 3,2                                                         | [1]        |
|                                                                                      | 200      | 21,6                                                        | [3]        |                                                               | 100      | 9,2                                                         | [1]        |
| KI                                                                                   | 300      | 21,6                                                        | [3]        | MnF <sub>2</sub> ( $\alpha_{\parallel}$ )                     | 200      | 14,9                                                        | [1]        |
|                                                                                      | 30       | 10,3                                                        | [3]        | ( $\alpha_{\perp}$ )                                          | 300      | 16,0                                                        | [1]        |
|                                                                                      | 50       | 19,3                                                        | [23]       |                                                               | 300      | 12,6                                                        | [28]       |
|                                                                                      | 100      | 30,3                                                        | [3]        | MnS                                                           | 300      | 3,5                                                         | [28]       |
|                                                                                      | 200      | 35,8                                                        | [23]       |                                                               | 100      | 17,3                                                        | [1]        |
|                                                                                      | 300      | 41,2                                                        | [3]        |                                                               | 156,7    | 49,9                                                        | [1]        |
| KNaC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> · 2H <sub>2</sub> O (сегнетова соль) | 100—200  | 38,0                                                        | [3]        |                                                               | 200      | 11,6                                                        | [1]        |
|                                                                                      | 200—300  | 40                                                          | [3]        |                                                               | 300      | 17,3                                                        | [34]       |
| LaB <sub>6</sub>                                                                     | 293      | 40,2                                                        | [3]        | MnS <sub>2</sub>                                              | 293—343  | 11,1                                                        | [16]       |
| LaF <sub>3</sub>                                                                     | 300      | 6,4                                                         | [38]       | MnO <sub>2</sub> ( $\alpha_a$ )                               | 300—773  | 6,69                                                        | [37]       |
| LaH <sub>2</sub>                                                                     | 300      | 20,0                                                        | [29]       | ( $\alpha_c$ )                                                | 300—773  | 6,93                                                        | [37]       |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                       | 300—923  | 10,6                                                        | [39]       | MoC                                                           | 285—463  | 7,8                                                         | [16]       |
|                                                                                      | 300—473  | 8,45                                                        | [31]       |                                                               | 300—1073 | 6,15                                                        | [16]       |
|                                                                                      | 300—1273 | 12,01                                                       | [37]       | Mo <sub>3</sub> N                                             | 293—1373 | 6,2                                                         | [16]       |
| LaS                                                                                  | 300      | 11,6                                                        | [25]       | MoS <sub>2</sub>                                              | 300—1273 | 10,7                                                        | [34]       |
| La <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                                       | 300      | 9,9                                                         | [25]       | MoSi                                                          | 293—1073 | 16,3                                                        | [16]       |
| La <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>                                                      | 300      | 11,9                                                        | [25]       | MoSi <sub>2</sub>                                             | 293—1723 | 5,1                                                         | [16]       |
| La <sub>2</sub> Si <sub>3</sub>                                                      | 300—1373 | 8,7                                                         | [16]       | NH <sub>4</sub> Br                                            | 300      | 59,3                                                        | [16]       |
| LiBr                                                                                 | 100—200  | 39,3                                                        | [16]       | NH <sub>4</sub> Cl                                            | 313      | 62,5                                                        | [16]       |
|                                                                                      | 200—300  | 46,6                                                        | [16]       | NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ( $\alpha_a$ ) | 200      | 87                                                          | [3]        |
|                                                                                      | 273—350  | 46,6                                                        | [16]       | ( $\alpha_b$ )                                                | 290      | 80                                                          | [26]       |
| LiCl                                                                                 | 273—350  | 40,6                                                        | [16]       | ( $\alpha_c$ )                                                | 200      | 40                                                          | [3]        |
| LiF                                                                                  | 30       | 0,24                                                        | [3]        |                                                               | 290      | 35                                                          | [26]       |
|                                                                                      | 50       | 2,96                                                        | [3]        |                                                               | 200      | 41                                                          | [3]        |
|                                                                                      | 100      | 15,2                                                        | [3]        | NaBr                                                          | 290      | 61                                                          | [26]       |
|                                                                                      | 200      | 28,1                                                        | [3]        |                                                               | 100—200  | 31,0                                                        | [16]       |
| LiI                                                                                  | 300      | 33,7                                                        | [3]        |                                                               | 200—300  | 36,7                                                        | [16]       |
|                                                                                      | 100—200  | 47                                                          | [16]       | NaCl                                                          | 288—333  | 45,5                                                        | [16]       |
|                                                                                      | 200—300  | 55,7                                                        | [16]       |                                                               | 100      | 33,9                                                        | [16]       |
| LiNbO <sub>3</sub> ( $\alpha_{\parallel}$ )                                          | 273—350  | 56                                                          | [16]       |                                                               | 200      | 37                                                          | [16]       |
|                                                                                      | 100      | 1,0                                                         | [24]       | NaF                                                           | 300      | 39,6                                                        | [16]       |
|                                                                                      | 200      | 3,8                                                         | [24]       |                                                               | 90—300   | 23,0                                                        | [3]        |
|                                                                                      | 300      | 4,0                                                         | [24]       |                                                               | 300      | 33,13                                                       | [3]        |
|                                                                                      | 400      | 2,0                                                         | [24]       | NaH                                                           | 468      | 35,9                                                        | [16]       |
|                                                                                      | 600      | 2,0                                                         | [24]       | NaNO <sub>3</sub>                                             | 300—673  | 64,0                                                        | [39]       |
|                                                                                      |          |                                                             |            |                                                               | 323      | 11                                                          | [16]       |
|                                                                                      |          |                                                             |            |                                                               | 400      | 12,4                                                        | [16]       |

| Вещество                               | $T, \Delta T, K$ | $\frac{\alpha_s}{10^{-6}}, \frac{\alpha_r}{K^{-1}}$ | Литература | Вещество                | $T, \Delta T, K$ | $\frac{\alpha_s}{10^{-6}}, \frac{\alpha_r}{K^{-1}}$ | Литература |
|----------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|------------|-------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|------------|
| $Na_2WO_4$                             | 300              | 18,2                                                | [16]       | $Pr_2S_3$               | 300              | 11,3                                                | [25]       |
| $NbB_2$                                | 300—1273         | 8,0                                                 | [34]       | $Pr_2Se_3$              | 300              | 13,0                                                | [25]       |
| $NbC$                                  | 300—773          | 6,25                                                | [32]       | $PuC$                   | 300—1053         | 10,7                                                | [34]       |
| $NbN$                                  | 300—1273         | 10,1                                                | [34]       | $Pu_2C_3$               | 300—1053         | 14,7                                                | [34]       |
| $Nb_2O_5$                              | 300—473          | 0,0                                                 | [31]       | $PuO_2$                 | 300—773          | 9                                                   | [31]       |
|                                        | 473—673          | -1,2                                                | [31]       |                         | 400—1184         | 15,2                                                | [31]       |
|                                        | 300—1073         | 5,8                                                 | [31]       | $RbBr$                  | 100—200          | 32,3                                                | [16]       |
| $Nb_2S_3$                              | 300—1273         | 10,0                                                | [34]       |                         | 200—300          | 34,7                                                | [16]       |
| $NdB_6$                                | 300—1273         | 7,3                                                 | [16]       | $RbCl$                  | 100—200          | 30,5                                                | [16]       |
| $Nd_2O_3$                              | 473              | 5,53                                                | [37]       |                         | 200—300          | 32,8                                                | [16]       |
|                                        | 1073             | 11,37                                               | [25]       | $RbHSO_4 (\alpha_a)$    | 100              | 50                                                  | [3]        |
| $Nd_2O_2Te$                            | 300              | 12,5                                                | [25]       |                         | 200              | 60                                                  | [3]        |
| $NdS$                                  | 300              | 15,4                                                | [25]       |                         | 300              | 60                                                  | [3]        |
| $Nd_2S_3$                              | 300              | 12,9                                                | [25]       | $(\alpha_b)$            | 100              | 30                                                  | [3]        |
| $Nd_2Se_3$                             | 300              | 13,5                                                | [25]       |                         | 200              | 50                                                  | [3]        |
| $NiO$                                  | 300              | 10                                                  | [31]       | $(\alpha_c)$            | 300              | 33                                                  | [3]        |
|                                        | 473              | 13,0                                                | [37]       |                         | 100              | 35                                                  | [3]        |
|                                        | 675              | 13,5                                                | [37]       |                         | 200              | 49                                                  | [3]        |
| $Ni_2P$                                | 300—1073         | 15,05                                               | [34]       | $RbI$                   | 300              | 70                                                  | [3]        |
| $Ni_3P$                                | 300—1073         | 12,65                                               | [34]       |                         | 100—200          | 37,3                                                | [16]       |
| $NiS$                                  | 100              | 0,03                                                | [3]        |                         | 200—300          | 39,7                                                | [16]       |
|                                        | 200              | -13,5                                               | [3]        | $RbHSO_4 (\alpha_a)$    | 300              | 60                                                  | [3]        |
|                                        | 300              | 1,1                                                 | [3]        | $(\alpha_b)$            | 300              | 33                                                  | [3]        |
| $NiSe$                                 | 100              | 8,7                                                 | [3]        | $(\alpha_c)$            | 300              | 70                                                  | [3]        |
|                                        | 200              | 29,5                                                | [3]        | $Rh_2O_3 (\alpha_{  })$ | 300              | 5,25                                                | [31]       |
|                                        | 300              | 20,0                                                | [3]        | $(\alpha_{\perp})$      | 300              | 5,35                                                | [31]       |
| $Ni_2Si$                               | 300—1143         | 16,5                                                | [34]       | $RuO_2 (\alpha_{  })$   | 300              | -1,4                                                | [28]       |
| $NiTe$                                 | 100              | 7,5                                                 | [3]        | $(\alpha_{\perp})$      | 300              | 7,0                                                 | [28]       |
|                                        | 200              | 24,0                                                | [3]        | $Sb_2O_3$               | 313              | 19,63                                               | [16]       |
|                                        | 300              | 15,0                                                | [3]        | $Sb_2S_3$               | 573—773          | 17                                                  | [1]        |
| $PbCl_2$                               | 293—393          | 31                                                  | [13]       | $SbSI (\alpha_{  })$    | 300              | 15                                                  | [3]        |
| $PbNO_3$                               | 348—453          | 31,6                                                | [16]       | $(\alpha_{\perp})$      | 300              | 42                                                  | [3]        |
| $PbO_2 (\alpha_{  })$                  | 300              | 9,3                                                 | [28]       |                         | 573—773          | 16                                                  | [1]        |
| $(\alpha_{\perp})$                     | 300              | 8,4                                                 | [28]       | $Sb_2Se_3$              | 573—773          | 12                                                  | [1]        |
| $PbS$                                  | 30               | 7,54                                                | [1]        | $Sb_2Te_3$              | 573—773          | 7,6                                                 | [34]       |
|                                        | 50               | 12,4                                                | [1]        | $ScB_2 (\alpha_c)$      | 300—873          | 6,8                                                 | [34]       |
|                                        | 100              | 17,6                                                | [1]        | $(\alpha_a)$            | 300—873          | 8,5                                                 | [31]       |
|                                        | 200              | 19,8                                                | [1]        | $Sc_2O_3$               | 300—673          | 0,3                                                 | [1]        |
|                                        | 300              | 20,3                                                | [1]        | $\alpha-SiC$            | 100              | 1,2                                                 | [1]        |
| $PbSe$                                 | 30               | 7,65                                                | [1]        |                         | 200              | 2,8                                                 | [1]        |
|                                        | 50               | 12,9                                                | [1]        | $(\alpha_{  })$         | 300              | 4,0                                                 | [1]        |
|                                        | 100              | 17,4                                                | [1]        |                         | 400              | 4,6                                                 | [1]        |
|                                        | 200              | 18,9                                                | [1]        | $(\alpha_{\perp})$      | 600              | 4,7                                                 | [1]        |
|                                        | 300              | 19,8                                                | [1]        |                         | 800              | 3,9                                                 | [1]        |
| $PbTe$                                 | 30               | 9,02                                                | [1]        |                         | 600              | 4,2                                                 | [1]        |
|                                        | 50               | 14,3                                                | [1]        | $\beta-SiC$             | 800              | 4,3                                                 | [1]        |
|                                        | 100              | 17,7                                                | [1]        |                         | 100              | 0,3                                                 | [1]        |
|                                        | 200              | 19,6                                                | [1]        |                         | 200              | 1,2                                                 | [1]        |
|                                        | 300              | 19,8                                                | [1]        |                         | 300              | 2,8                                                 | [1]        |
| $PbTiO_3$                              | 800              | 8,3                                                 | [13]       |                         | 400              | 4,0                                                 | [1]        |
| $PbTi_{0,48}, Zr_{0,52}O_3 (\alpha_1)$ | 300              | 1,0                                                 | [40]       |                         | 600              | 4,5                                                 | [1]        |
|                                        | 400              | 2,0                                                 | [40]       | $Si_3N_4$               | 800              | 4,5                                                 | [1]        |
|                                        | 600              | 4,0                                                 | [40]       | $SiO_2$ (плавл.)        | 300              | 2,7                                                 | [29]       |
| $(\alpha_3)$                           | 300              | 4,0                                                 | [40]       |                         | 4                | -0,2                                                | [1]        |
|                                        | 400              | 2,0                                                 | [40]       |                         | 10               | -2,75                                               | [1]        |
|                                        | 600              | -5                                                  | [40]       |                         | 30               | -8,54                                               | [1]        |
| $PbZrO_3$                              | 600              | 11,0                                                | [18]       |                         | 50               | -8,46                                               | [1]        |
| $PrB_6$                                | 300              | 7,5                                                 | [38]       |                         | 100              | -6,10                                               | [1]        |
| $Pr_2O_3$                              | 293—373          | 8,0                                                 | [31]       |                         | 200              | 0,45                                                | [1]        |
|                                        | 293—1273         | 8,3                                                 | [37]       |                         | 300              | 4,50                                                | [1]        |
| $Pr_2O_2Te_2$                          | 300              | 10,4                                                | [25]       |                         |                  |                                                     |            |
| $PrS$                                  | 300              | 14,3                                                | [25]       |                         |                  |                                                     |            |

| Вещество                           | $T, \Delta T, K$ | $\frac{\alpha_s}{10^{-6}} \frac{\alpha_s}{K^{-1}}$ | Литература | Вещество                                                           | $T, \Delta T, K$ | $\frac{\alpha_s}{10^{-6}} \frac{\alpha_s}{K^{-1}}$ | Литература |
|------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|------------|
| SiO <sub>2</sub>                   | 400              | 6,10                                               | [1]        | TiO <sub>2</sub> ( $\alpha_{  }$ )                                 | 300              | 9,80                                               | [31]       |
|                                    | 600              | 6,25                                               | [1]        |                                                                    | 300—673          | 10,1                                               | [31]       |
|                                    | 800              | 4,80                                               | [1]        |                                                                    | 670—1073         | 10,8                                               | [31]       |
| ( $\alpha_{  }$ )                  | 300—673          | 4,1                                                | [31]       | ( $\alpha_{\perp}$ )                                               | 300              | 7,44                                               | [31]       |
| ( $\alpha_{\perp}$ )               | 300—673          | 6,6                                                | [31]       |                                                                    | 300—673          | 8,0                                                | [31]       |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 300—1073         | 10,8                                               | [37]       |                                                                    | 670—1073         | 8,3                                                | [31]       |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Te  | 300              | 13,5                                               | [25]       | Ti <sub>2</sub> O                                                  | 300—400          | 4,5                                                | [31]       |
| SmS                                | 100              | 7,2                                                | [3]        | TiP                                                                | 300              | 8,2                                                | [34]       |
|                                    | 200              | 11,3                                               | [3]        | Ti <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                     | 300—1273         | 17,0                                               | [34]       |
|                                    | 300              | 11,8                                               | [3]        | TiB <sub>2</sub>                                                   | 300—1573         | 8,1                                                | [16]       |
| Sm <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>    | 300              | 14,8                                               | [25]       | TiBr                                                               | 243—398          | 51,2                                               | [16]       |
| SnO <sub>2</sub> ( $\alpha_{cp}$ ) | 300              | 3,4                                                | [31]       | TiCl                                                               | 288—333          | 54,6                                               | [17]       |
| ( $\alpha_{  }$ )                  | 300—680          | 5,6                                                | [31]       | TiI                                                                | 300              | 45,0                                               | [16]       |
| ( $\alpha_{\perp}$ )               | 300—680          | 4,3                                                | [31]       | Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     | 373—573          | 7,1                                                | [31]       |
| $\alpha$ -SnS ( $\alpha_{cp}$ )    | 300              | 14,1                                               | [1]        | UB <sub>2</sub> ( $\alpha_a$ )                                     | 300—573          | 9,0                                                | [34]       |
| $\beta$ -SnS ( $\alpha_{cp}$ )     | 300              | 15,0                                               | [1]        | ( $\alpha_c$ )                                                     | 300—573          | 8,0                                                | [34]       |
| $\alpha$ -SnSe ( $\alpha_{cp}$ )   | 300              | 16,9                                               | [1]        | UB <sub>4</sub>                                                    | 300—1273         | 7,0                                                | [34]       |
| ( $\alpha_a$ )                     | 300              | —26,6                                              | [1]        | UC                                                                 | 300—1273         | 10,4                                               | [34]       |
| ( $\alpha_b$ )                     | 300              | 26,7                                               | [1]        | UN                                                                 | 318—1273         | 8,61                                               | [34]       |
| ( $\alpha_c$ )                     | 300              | 35,5                                               | [1]        | UO <sub>2</sub>                                                    | 300—673          | 9,2                                                | [31]       |
| $\beta$ -SnSe ( $\alpha_{cp}$ )    | 300              | 22,1                                               | [1]        |                                                                    | 673—1073         | 10,8                                               | [41]       |
| SnTe                               | 30               | 6,4                                                | [1]        | US                                                                 | 300—1253         | 11,9                                               | [34]       |
|                                    | 50               | 14,0                                               | [1]        | VC                                                                 | 100              | 5,7                                                | [28]       |
|                                    | 100              | 17,6                                               | [1]        |                                                                    | 200              | 6,2                                                | [28]       |
|                                    | 200              | 20,4                                               | [1]        |                                                                    | 300              | 6,6                                                | [3]        |
|                                    | 300              | 20,8                                               | [1]        |                                                                    | 300—573          | 7,2                                                | [27]       |
| SrB <sub>6</sub>                   | 300              | 6,7                                                | [38]       | V <sub>3</sub> N                                                   | 300—1373         | 8,1                                                | [34]       |
| (SrBi)TiO <sub>3</sub>             | 300              | 9                                                  | [24]       | WB <sub>4</sub>                                                    | 300              | 5,8                                                | [34]       |
| SrF <sub>2</sub>                   | 30               | 0,4                                                | [1]        | W <sub>2</sub> B                                                   | 300              | 6,7                                                | [34]       |
|                                    | 50               | 2,1                                                | [1]        | WC                                                                 | 300—673          | 3,84                                               | [27]       |
|                                    | 100              | 8,5                                                | [1]        | WSi <sub>2</sub>                                                   | 300—700          | 6,25                                               | [34]       |
|                                    | 200              | 15,7                                               | [1]        | YbB <sub>6</sub>                                                   | 300              | 5,8                                                | [34]       |
|                                    | 273              | 17,5                                               | [1]        | Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     | 373—573          | 4,9                                                | [31]       |
| Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>  | 348              | 32,2                                               | [16]       |                                                                    | 300—1273         | 9,30                                               | [31]       |
| SrO                                | 300              | 13,9                                               | [31]       | YAlO <sub>3</sub>                                                  | 300              | ~7                                                 | [29]       |
| SrO <sub>2</sub> ( $\alpha_{  }$ ) | 300              | 3,6                                                | [28]       | Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                     | 100              | 4,25                                               | [20]       |
| ( $\alpha_{\perp}$ )               | 300              | 3,3                                                | [28]       |                                                                    | 200              | 5,8                                                | [29]       |
|                                    | 300              | 9,4                                                | [13]       |                                                                    | 300              | 7,5                                                | [20]       |
| SrTiO <sub>3</sub>                 | 300              | 8,2                                                | [34]       | Y <sub>3</sub> AlFe <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                   | 200              | 6,3                                                | [3]        |
| TaB <sub>3</sub>                   | 300—1273         | 6,29                                               | [27]       |                                                                    | 300              | 8,5                                                | [30]       |
| TaC                                | 300—773          | 3,6                                                | [34]       | YB <sub>2</sub> ( $\alpha_a$ )                                     | 600              | 11,1                                               | [3]        |
| TaN                                | 300—973          | 5,2                                                | [16]       | ( $\alpha_c$ )                                                     | 300              | 9,4                                                | [34]       |
| Ta <sub>2</sub> N                  | 300—1273         | 0,8                                                | [31]       | YB <sub>6</sub>                                                    | 300              | 8,5                                                | [34]       |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>     | 300—673          | 13,9                                               | [25]       | Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                     | 300              | 6,2                                                | [38]       |
| Ta <sub>2</sub> S <sub>2</sub>     | 300              | 8,85                                               | [16]       |                                                                    | 200              | 7,0                                                | [29]       |
| TaSi <sub>2</sub>                  | 300—1273         | 7,8                                                | [38]       |                                                                    | 300              | 8,3                                                | [30]       |
| TbB <sub>6</sub>                   | 300              | 9,8                                                | [3]        |                                                                    | 600              | 11,0                                               | [30]       |
| TbBi                               | 300              | 3                                                  | [31]       | Y <sub>1,5</sub> Gd <sub>1,5</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> | 200              | 6,3                                                | [30]       |
| TbO <sub>1,81</sub>                | 300—1273         | 5,8                                                | [34]       |                                                                    | 300              | 8,1                                                | [3]        |
| ThB <sub>6</sub>                   | 300—1073         | 7,8                                                | [38]       |                                                                    | 623              | 10,4                                               | [30]       |
|                                    | 300              | 6,53                                               | [34]       | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 473              | 6,9                                                | [13]       |
| ThC                                | 300—673          | 7,1                                                | [31]       |                                                                    | 1073             | 8,1                                                | [13]       |
| ThO <sub>2</sub>                   | 300—873          | 7,7                                                | [31]       | YVO <sub>4</sub>                                                   | 300              | 20                                                 | [29]       |
|                                    | 300—1053         | 10,2                                               | [34]       | Zn <sub>3</sub> As <sub>2</sub>                                    | 300              | 10,4                                               | [3]        |
| ThS                                | 290—673          | 5,5                                                | [16]       | ZnCl                                                               | 300—433          | 29                                                 | [16]       |
| TiB <sub>2</sub>                   | 100              | 6,2                                                | [3]        | ZnF <sub>2</sub> ( $\alpha_{  }$ )                                 | 300              | 11,3                                               | [28]       |
| TiC                                | 200              | 6,8                                                | [27]       | ( $\alpha_{\perp}$ )                                               | 300              | 8,6                                                | [28]       |
|                                    | 300              | 7,3                                                | [3]        | ZnGeAs <sub>2</sub>                                                | 300              | 1,0                                                | [25]       |
| TiI <sub>4</sub>                   | 243—398          | 74                                                 | [16]       | ZnO ( $\alpha_{  }$ )                                              | 30               | —0,48                                              | [3]        |
| TiN                                | 300              | 4,7                                                | [34]       |                                                                    | 50               | —0,88                                              | [31]       |
|                                    | 300—1373         | 9,35                                               | [34]       |                                                                    | 100              | —0,62                                              | [3]        |
| TiO                                | 300              | 6,73                                               | [31]       |                                                                    | 200              | 1,58                                               | [31]       |



| Вещество                       | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература | Вещество            | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература |
|--------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------|---------------------|------------------|----------------------------------------|------------|
| ZnO ( $\alpha_{  }$ )          | 300              | 2,92                                   | [3]        | ZnSe                | 400              | 8,17                                   | [1]        |
|                                | 300—673          | 5,0                                    | [34]       |                     | 600              | 9,97                                   | [1]        |
|                                | 30               | —0,27                                  | [3]        |                     | 800              | 11,69                                  | [1]        |
| (ZnO) ( $\alpha_{\perp}$ )     | 50               | —0,50                                  | [31]       | ZnSnAs <sub>2</sub> | 300              | 2,3                                    | [25]       |
|                                | 100              | —0,04                                  | [3]        |                     | 30               | —0,72                                  | [1]        |
|                                | 200              | 2,88                                   | [31]       |                     | 50               | 0,36                                   | [1]        |
|                                | 300              | 4,75                                   | [3]        | ZnTe                | 100              | 4,17                                   | [1]        |
|                                | 300—673          | 5,5                                    | [34]       |                     | 200              | 7,58                                   | [1]        |
|                                | 300              | 8,33                                   | [3]        |                     | 300              | 8,29                                   | [1]        |
| Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub> | 50               | —0,34                                  | [1]        |                     | 400              | 8,7                                    | [1]        |
| ZnS (куб.)                     | 100              | 1,72                                   | [1]        |                     | 700              | 9,65                                   | [1]        |
|                                | 200              | 5,17                                   | [1]        | ZrB <sub>2</sub>    | 300—1073         | 5,9                                    | [34]       |
|                                | 300              | 6,0                                    | [1]        |                     | 100              | 5,1                                    | [3]        |
|                                | 600              | 6                                      | [1]        |                     | 200              | 5,8                                    | [32]       |
|                                | 800              | 6                                      | [1]        | ZrC                 | 300              | 6,1                                    | [27]       |
|                                | 100              | 2,0                                    | [1]        |                     | 300—873          | 6,80                                   | [3]        |
| ZnS (гекс.)                    | 200              | 5,0                                    | [1]        |                     | 300—1373         | 7,24                                   | [34]       |
|                                | 300              | 6,1                                    | [1]        | ZrN                 | 300—453          | 4,5                                    | [31]       |
|                                | 800              | 6                                      | [1]        |                     | 300—873          | 8,4                                    | [37]       |
|                                | 30               | —2,87                                  | [1]        | ZrS <sub>2</sub>    | 300—1273         | 11,7                                   | [34]       |
| ZnSe                           | 50               | —1,51                                  | [1]        |                     | 300              | 7,5                                    | [24]       |
|                                | 100              | 2,57                                   | [1]        | ZrTiO <sub>4</sub>  |                  |                                        |            |
|                                | 200              | 5,86                                   | [1]        |                     |                  |                                        |            |
|                                | 300              | 7,14                                   | [1]        |                     |                  |                                        |            |

Таблица 10.3. Температурный коэффициент линейного расширения неорганических соединений при температуре выше 1000° С. Приведены значения истинного ТКЛР  $\alpha$  (при данной температуре  $T$ ) или среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$  (в интервале  $\Delta T$ )

| Вещество                                               | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература | Вещество                       | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература |
|--------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------|--------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | 20—1000          | 8,1                                    | [31]       | CeO <sub>2</sub>               | 20—1000          | 8,5                                    | [37]       |
|                                                        | 20—1200          | 9,1                                    | [37]       |                                | 20—1200          | 12,5                                   | [37]       |
|                                                        | 20—1400          | 9,8                                    | [31]       | CrB                            | 20—1000          | 12,3                                   | [34]       |
|                                                        | 20—1600          | 10,3                                   | [37]       |                                | 1000—2000        | 12,6                                   | [34]       |
|                                                        | 20—1800          | 10,6                                   | [31]       | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> | 20—1000          | 11,7                                   | [27]       |
|                                                        | 20—2000          | 9,14                                   | [37]       |                                | 20—1200          | 11,7                                   | [27]       |
| (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ( $\alpha_{  }$ )    | 1027             | 11,04                                  | [37]       | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20—1400          | 9,6                                    | [31]       |
|                                                        | 1727             | 11,99                                  | [37]       |                                | 20—1000          | 10,3                                   | [37]       |
| (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ( $\alpha_{\perp}$ ) | 1027             | 9,97                                   | [37]       | Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20—1200          | 10,3                                   | [37]       |
|                                                        | 1727             | 10,75                                  | [37]       |                                | 20—1600          | 10,4                                   | [37]       |
| B <sub>4</sub> C                                       | 80—1000          | 4,6                                    | [34]       | HfB <sub>2</sub>               | 20—1000          | 6,3                                    | [34]       |
|                                                        | 1200             | 3,1                                    | [34]       |                                | 1100—2100        | 6,8                                    | [34]       |
| BeO                                                    | 20—1000          | 9                                      | [31]       | HfC                            | 20—1000          | 6,6                                    | [15]       |
|                                                        | 20—1200          | 10,1                                   | [37]       |                                | 20—1200          | 6,67                                   | [32]       |
|                                                        | 20—1400          | 10,3                                   | [31]       |                                | 20—1400          | 6,8                                    | [15]       |
|                                                        | 20—1600          | 10,7                                   | [37]       |                                | 20—1600          | 6,87                                   | [32]       |
|                                                        | 20—1800          | 10,85                                  | [31]       |                                | 20—1800          | 6,66                                   | [15]       |
|                                                        | 20—2000          | 10,95                                  | [37]       |                                | 20—2000          | 6,8                                    | [32]       |
| CaO                                                    | 1200—2000        | 13,4                                   | [37]       | HfO <sub>2</sub>               | 20—2200          | 6,9                                    | [15]       |
|                                                        | 20—1000          | 14,2                                   | [31]       |                                | 20—2900          | 8,0                                    | [32]       |
|                                                        | 20—1200          | 14,75                                  | [37]       |                                | 250—1300         | 5,8                                    | [37]       |
|                                                        | 20—1600          | 15,71                                  | [31]       | MgO                            | 20—1700          | 6,45                                   | [37]       |
|                                                        | 20—1800          | 16,02                                  | [37]       |                                | 20—1000          | 14,2                                   | [31]       |
| Cd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | 20—2000          | 16,29                                  | [31]       |                                | 20—1200          | 15,38                                  | [31]       |
|                                                        | 20—1000          | 10,5                                   | [37]       |                                | 20—1400          | 15,95                                  | [31]       |
|                                                        | 20—1400          | 10,5                                   | [37]       |                                | 20—1600          | 16,47                                  | [31]       |

| Вещество                       | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература | Вещество                       | $T, \Delta T, K$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} K^{-1}$ | Литература |
|--------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------|--------------------------------|------------------|----------------------------------------|------------|
| MgO                            | 20—1800          | 17,08                                  | [31]       | ThO <sub>2</sub>               | 1400—1970        | 12,31                                  | [37]       |
|                                | 20—2000          | 17,49                                  | [31]       |                                | 2000—2300        | 13,3                                   | [37]       |
| MoC                            | 20—2200          | 18,60                                  | [31]       | TiB <sub>2</sub>               | 20—1000          | 4,6                                    | [34]       |
|                                | 20—1000          | 6,4                                    | [27]       |                                | 1000—2000        | 5,2                                    | [34]       |
|                                | 20—1200          | 6,7                                    | [27]       | TiN                            | 20—1000          | 7,5                                    | [34]       |
|                                | 20—1400          | 7,0                                    | [27]       |                                | 20—1200          | 7,5                                    | [34]       |
|                                | 20—1600          | 7,35                                   | [27]       |                                | 20—1400          | 7,9                                    | [34]       |
|                                | 20—1800          | 7,6                                    | [27]       |                                | 20—1600          | 8,1                                    | [34]       |
| NbB <sub>2</sub>               | 20—2100          | 9,75                                   | [27]       |                                | 20—1800          | 8,3                                    | [34]       |
|                                | 20—1000          | 8,0                                    | [34]       |                                | 20—2000          | 8,5                                    | [34]       |
| NbC                            | 20—2000          | 8,5                                    | [34]       |                                | 20—2200          | 9,1                                    | [34]       |
|                                | 20—1000          | 6,88                                   | [27]       |                                | 20—2700          | 9,6                                    | [34]       |
|                                | 20—1200          | 6,90                                   | [27]       | UO <sub>2</sub>                | 800—1260         | 12,9                                   | [41]       |
|                                | 20—1400          | 6,92                                   | [27]       | VB <sub>2</sub>                | 20—1000          | 7,6                                    | [34]       |
|                                | 20—1600          | 7,15                                   | [27]       |                                | 20—2000          | 8,3                                    | [34]       |
|                                | 20—1800          | 7,41                                   | [27]       | VC                             | 20—1000          | 6,25                                   | [27]       |
|                                | 20—2000          | 7,57                                   | [27]       |                                | 20—1200          | 6,60                                   | [27]       |
|                                | 20—2900          | 8,02                                   | [27]       |                                | 20—1400          | 6,95                                   | [27]       |
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1000             | 11,37                                  | [27]       |                                | 20—1600          | 7,45                                   | [27]       |
|                                | 100—1000         | 11,8                                   | [37]       |                                | 20—1800          | 8,10                                   | [27]       |
| NiO                            | 1000             | 14,1                                   | [37]       |                                | 20—2000          | 8,95                                   | [27]       |
|                                | 1400             | 14,9                                   | [37]       |                                | 20—2200          | 9,60                                   | [27]       |
|                                | 1800             | 16,3                                   | [37]       | WC                             | 20—1000          | 4,87                                   | [27]       |
| Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20—900           | 7,6                                    | [37]       |                                | 0—2400           | 7,3                                    | [27]       |
|                                | 20—1800          | 7,7                                    | [37]       | Yt <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1000             | 8,3                                    | [31]       |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20—1000          | 9,9                                    | [37]       |                                | 1200             | 8,6                                    | [31]       |
|                                | 20—1400          | 9,3                                    | [37]       |                                | 1400             | 8,8                                    | [31]       |
| TaB <sub>2</sub>               | 20—1000          | 8,2                                    | [34]       |                                | 1600             | 9,1                                    | [31]       |
|                                | 1000—2000        | 8,8                                    | [34]       |                                | 1800             | 9,3                                    | [31]       |
| TaC                            | 20—1000          | 6,64                                   | [27]       | ZrB <sub>2</sub>               | 20—1000          | 5,9                                    | [34]       |
|                                | 20—1200          | 6,67                                   | [27]       |                                | 1000—2000        | 6,5                                    | [34]       |
|                                | 20—1400          | 6,89                                   | [27]       | ZrC                            | 20—1000          | 6,99                                   | [27]       |
|                                | 20—1600          | 7,29                                   | [27]       |                                | 20—1300          | 7,20                                   | [27]       |
|                                | 20—1800          | 7,59                                   | [27]       |                                | 20—1800          | 8,1                                    | [27]       |
|                                | 20—2000          | 7,94                                   | [27]       |                                | 20—2400          | 8,77                                   | [27]       |
|                                | 20—2900          | 8,81                                   | [27]       | ZrO <sub>2</sub>               | 20—1000          | 9,1                                    | [31]       |
| ThO <sub>2</sub>               | 20—1000          | 9,4                                    | [31]       |                                | 20—1200          | 9,5                                    | [31]       |
|                                | 20—1200          | 10,3                                   | [31]       |                                | 20—1400          | 9,47                                   | [37]       |
|                                | 20—1400          | 10,4                                   | [31]       |                                | 20—2100          | 13,0                                   | [37]       |

Таблица 10.4. Средний температурный коэффициент линейного расширения кварцевых и оптических стекол  $\alpha, 10^{-7} K^{-1}$  [4, 42, 43] (Если температура отличается от указанной, ее значение приводится в круглых скобках)

| Марка стекла | $\Delta T, K$ |         |         |         |
|--------------|---------------|---------|---------|---------|
|              | 170—293       | 210—293 | 293—300 | 293—400 |

## Кварцевые стекла

|                                                         |                |                |            |  |
|---------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------|--|
| КЛР-1                                                   | —1,5 (223—293) | —1,0 (273—293) |            |  |
| КЛР-2                                                   | —1,9 (223—293) | —1,0 (273—293) |            |  |
| КЧГ                                                     | 4,2 (223—293)  | 4,5 (273—293)  |            |  |
| КУ-2, КВ (истинный ТКЛР, $\alpha, 10^{-7} K^{-1}$ [61]) | —1,10 (170)    | 1,40 (210)     | 4,7 (293)  |  |
|                                                         | 6,1 (473)      | 5,3 (673)      | 3,4 (1073) |  |
| Пирекс                                                  | 28,2           | 29,2           | 39,2       |  |

## Оптические стекла

|     |      |      |      |     |
|-----|------|------|------|-----|
| ЛК1 | 110  | 111  | 112  | 113 |
| ЛК3 | 85   | 86   | 88,4 | 92  |
| ЛК4 | 49   | 50   | 51,5 | 52  |
| ЛК5 | 32,0 | 33,0 | 34,4 | 35  |

Продолжение табл. 10.4

| Марка стекла | $\Delta T, K$ |         |         |           |
|--------------|---------------|---------|---------|-----------|
|              | 170—293       | 210—293 | 293—300 | 293—400   |
| ЛК6          | 78,0          | 80,0    | 81,4    | 83        |
| ЛК7          | 38,0          | 40,0    | 41,3    | 44        |
| ЛК8          | —             | 54,0    | 55,3    | 56        |
| ЛК103        | —             | 84,0    | 86,4    | —         |
| ЛК105        | —             | 32,0    | 34,5    | —         |
| ЛК107        | —             | 40,0    | 41,2    | —         |
| ФК1          | 83,0          | 84,0    | 87,2    | 91        |
| ФК3          | —             | —       | —       | 78        |
| ФК4          | —             | —       | —       | 107       |
| ФК13         | 61,0          | 62,0    | 68,2    | 73        |
| ФК14         | —             | 88,0    | 92,0    | 98        |
| ФК113        | —             | 63,0    | 64,0    | (273—293) |
| ФК114        | —             | 87,0    | 92,0    | (273—293) |
| K1           | 59,0          | 60,0    | 62,7    | 65        |
| K2           | 56,0          | 57,0    | 60,3    | 64        |
| K3           | 72,0          | 74,0    | 77,3    | 83        |
| K5           | 66,0          | 67,0    | 70,3    | 74        |
| K8           | 66,0          | 68,0    | 73,2    | 76        |
| K14          | 61,0          | 62,0    | 66,0    | 70        |
| K15          | 79,0          | 81,0    | 89,0    | 93        |

| Марка стекла | $\Delta T, K$ |         |         |           |
|--------------|---------------|---------|---------|-----------|
|              | 170—293       | 210—293 | 293—300 | 293—400   |
| K17          | 64,0          | 66,0    | 69,4    | 74        |
| K18          | 62,0          | 64,0    | 67,4    | 71        |
| K19          | 72,0          | 74,0    | 76,5    | 80        |
| K20          | 68,0          | 69,0    | 71,3    | 75        |
| K100         | —             | 70,0    | 73,5    | (273—293) |
| K108         | —             | 66,0    | 69,3    | (273—293) |
| K119         | —             | 70,0    | 73,5    | (273—293) |
| OK1          | —             | —       | —       | 136       |
| BK4          | 73,0          | 74,0    | 76,2    | 80        |
| BK6          | 73,0          | 74,0    | 77,1    | 83        |
| BK8          | 55,0          | 56,0    | 59,1    | 63        |
| BK9          | 67,0          | 68,0    | 72,1    | 76        |
| BK10         | 63,0          | 65,0    | 67,0    | 72,5      |
| BK11         | 59,0          | 60,0    | 62,1    | 66,5      |
| BK12         | 70,0          | 71,0    | 73,1    | 77        |
| BK13         | 61,0          | 62,0    | 65,1    | 68,9      |
| BK104        | —             | 71,0    | 74,2    | —         |
| BK106        | —             | 75,0    | 78,3    | —         |
| BK110        | —             | 65,0    | 67,2    | —         |
| BBK1         | —             | —       | —       | 99        |
| BBK2         | —             | —       | —       | 94        |
| TK1          | 58,0          | 59,0    | 60,2    | 61        |
| TK2          | 63,0          | 64,0    | 67,2    | 70        |
| TK3          | —             | 54,0    | —       | 60        |
| TK4          | 58,0          | 59,0    | 62,2    | 66        |
| TK7          | —             | 67,0    | —       | 73        |
| TK8          | 60,0          | 62,0    | 66,2    | 70        |
| TK9          | 67,0          | 68,0    | 72,1    | 76        |
| TK12         | 57,0          | 58,0    | 61,2    | 65        |
| TK13         | 60,0          | 61,0    | 64,1    | 67        |
| TK14         | 61,0          | 63,0    | 65,1    | 69        |
| TK16         | 63,0          | 66,0    | 69,1    | 71        |
| TK17         | 68,0          | 68,0    | 72,2    | 75,5      |
| TK20         | 66,0          | 67,0    | 70,1    | 73        |
| TK21         | 72,0          | 73,0    | 76,1    | 81        |
| TK23         | 51,0          | 52,0    | 55,2    | 58        |
| TK104        | —             | 58,0    | 61,3    | —         |
| TK109        | —             | 68,0    | 71,2    | —         |
| TK114        | —             | 60,0    | 63,3    | —         |
| TK115        | —             | 63,0    | 66,3    | —         |
| TK121        | —             | 72,0    | 75,2    | —         |
| TK123        | —             | 50,0    | 54,4    | —         |
| STK3         | 69,0          | 71,0    | 74,0    | (273—293) |
| STK7         | 82,0          | 84,0    | 88,0    | (273—293) |
| STK8         | 83,0          | 84,0    | 87,0    | (273—293) |
| STK9         | 50,0          | 51,0    | 54,0    | (273—293) |
| STK10        | 43,0          | 45,0    | 49,0    | (273—293) |
| STK12        | 49,0          | 57,0    | 61,0    | (273—293) |
| STK15        | —             | 57,0    | 59,0    | (273—293) |
| STK16        | —             | 58,0    | 61,0    | (273—293) |
| STK19        | —             | 51,0    | 53,0    | (273—293) |
| KФ1          | 62,0          | 63,0    | 64,2    | 66        |
| KФ3          | —             | 83,0    | —       | 91        |
| KФ4          | 62,0          | 63,0    | 66,2    | 71        |
| KФ5          | 59,0          | 59,0    | 60,1    | 62        |
| KФ6          | 60,0          | 62,0    | 65,3    | 68        |
| KФ7          | 54,0          | 55,0    | 57,3    | 60        |
| KФ8          | 70,0          | 72,0    | 74,1    | 76        |
| БФ1          | 65,0          | 66,0    | 69,2    | 72,5      |
| БФ4          | 69,0          | 70,0    | 72,1    | 74        |
| БФ6          | 76,0          | 77,0    | 80,1    | 83        |
| БФ7          | 67,0          | 68,0    | 71,2    | 75        |
| БФ8          | 76,0          | 77,0    | 79,2    | 82        |
| БФ11         | 61,0          | 63,0    | 67,2    | 70        |
| БФ12         | 82,0          | 83,0    | 85,2    | 87,5      |

| Марка стекла | $\Delta T, K$ |         |         |           |
|--------------|---------------|---------|---------|-----------|
|              | 170—293       | 210—293 | 293—300 | 293—400   |
| БФ13         | 59,0          | 61,0    | 65,2    | 68        |
| БФ16         | 76,0          | 78,0    | 81,2    | 84        |
| БФ18         | 71,0          | 72,0    | 75,2    | 79        |
| БФ19         | 69,0          | 70,0    | 73,2    | 76        |
| БФ21         | 70,0          | 71,0    | 74,1    | 77        |
| БФ23         | 69,0          | 70,0    | 71,2    | 73        |
| БФ24         | 72,0          | 74,0    | 76,2    | 79        |
| БФ25         | 65,0          | 66,0    | 69,1    | 73        |
| БФ26         | 63,0          | 64,0    | 67,2    | 70        |
| БФ27         | 74,0          | 75,0    | 77,1    | 80        |
| БФ28         | 58,0          | 59,0    | 62,2    | 65        |
| БФ32         | —             | 103     | 107     | —         |
| БФ101        | —             | 66,0    | 69,8    | —         |
| БФ104        | —             | 69,0    | 72,0    | —         |
| БФ106        | —             | 76,0    | 79,0    | —         |
| БФ112        | —             | 78,0    | 82,0    | —         |
| БФ125        | —             | 65,0    | 69,0    | —         |
| ТБФ3, 4      | 63,0          | 65,0    | 69,0    | (273—293) |
| ТБФ5         | —             | 54,0    | 58,0    | 64        |
| ТБФ7         | —             | 58,0    | 61,0    | (273—293) |
| ТБФ8         | —             | 55,0    | 58,0    | (273—293) |
| ТБФ25        | —             | 55,0    | 59,0    | (273—293) |
| ЛФ1          | 79,0          | 80,0    | 83,2    | 84,5      |
| ЛФ5          | 66,0          | 67,0    | 69,4    | 72        |
| ЛФ7          | 70,0          | 71,0    | 73,3    | 74,5      |
| ЛФ8          | 83,0          | 84,0    | 87,5    | 90        |
| ЛФ9          | 80,0          | 81,0    | 85,5    | 89        |
| ЛФ10         | 71,0          | 72,0    | 74,6    | 78        |
| ЛФ11         | 70,0          | 71,0    | 72,8    | 74        |
| ЛФ12         | 85,0          | 86,0    | 88,3    | 91        |
| ЛФ105        | —             | 67,0    | 70,0    | —         |
| Ф1           | 70,0          | 71,0    | 72,2    | 74        |
| Ф2           | 69,0          | 70,0    | 72,2    | 75        |
| Ф4           | 72,0          | 73,0    | 74,1    | 75,5      |
| Ф6           | 69,0          | 70,0    | 72,2    | 74        |
| Ф7           | 68,0          | 70,0    | 72,2    | 74,5      |
| Ф8           | 94,0          | 95,0    | 98,1    | 101       |
| Ф9           | 89,0          | 90,0    | 93,1    | 96,5      |
| Ф13          | 69,0          | 71,0    | 72,2    | 74,5      |
| Ф18          | —             | 106     | 109     | —         |
| Ф101         | —             | 69,0    | 70,5    | —         |
| Ф104         | —             | 70,0    | 71,3    | —         |
| Ф106         | —             | 68,0    | 70,2    | —         |
| Ф108         | —             | 91,0    | 95,0    | —         |
| Ф109         | —             | 90,0    | 92,5    | —         |
| Ф113         | —             | 68,0    | 70,4    | —         |
| ТФ1          | 81,0          | 82,0    | 84,3    | 86,5      |
| ТФ2          | 71,0          | 73,0    | 75,3    | 79        |
| ТФ3          | 76,0          | 77,0    | 81,0    | 82,5      |
| ТФ4          | 76,0          | 77,0    | 80,4    | 82        |
| ТФ5          | 77,0          | 78,0    | 81,3    | 83        |
| ТФ7          | 92,0          | 93,0    | 95,3    | 96        |
| ТФ8          | 76,0          | 77,0    | 79,3    | 82        |
| ТФ10         | 74,0          | 75,0    | 77,4    | 82        |
| ТФ11         | 95,0          | 97,0    | 104     | 108       |
| ТФ103        | —             | 75,0    | 77,3    | —         |
| ТФ107        | —             | 88,0    | 90,4    | —         |
| ТФ110        | —             | 75,0    | 77,3    | —         |
| ОФ1          | 58,0          | 59,0    | 61,4    | 63        |
| ОФ2          | 69,0          | 70,0    | 72,2    | 74        |
| ОФ3          | 46,0          | 48,0    | 51,3    | 55,5      |
| ОФ4          | 46,0          | 48,0    | 51,3    | 52        |
| ОФ5          | 44,0          | 46,0    | 49,0    | 53        |
| ОФ101        | —             | 58,0    | 60,4    | —         |

Таблица 10.5. Температурный коэффициент линейного расширения технических стекол. Приведены значения истинного ТКЛР  $\alpha$  (при данной температуре) или среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$  (в интервале температур)

Продолжение табл. 10.5

| Стекло | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-7} \text{ К}^{-1}$ | Стекло | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-7} \text{ К}^{-1}$ |
|--------|-----------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------|
|--------|-----------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------|

Лазерные стекла СССР. 300—400 К [20, 29]

|       |     |               |       |
|-------|-----|---------------|-------|
| ГСЛ-1 | 94  | ГСЛ-21—ГСЛ-24 | 106*1 |
| ГСЛ-2 | 119 | ЛГС-247-2     | 116   |
| ГСЛ-3 | 121 | КГЗ-3         | 105*1 |
| ГСЛ-4 | 103 | КГС-5         | 104*1 |

Зарубежные лазерные стекла, 300 К [20]

|                 |     |                                  |       |
|-----------------|-----|----------------------------------|-------|
| FG <sub>1</sub> | 80  | LG <sub>1</sub>                  | 99,5  |
| FG <sub>2</sub> | 70  | LG <sub>2</sub>                  | 102,0 |
| FG <sub>3</sub> | 60  | LG <sub>3</sub>                  | 104,0 |
| LG-52           | 78  | LG <sub>4</sub> —LG <sub>6</sub> | 54,9  |
| LG-54           | 95  |                                  |       |
| LG-55           | 107 | Ва—крон                          | 110,0 |

Волоконно-оптическое стекло, 300 К [43]

|                  |    |                                       |       |
|------------------|----|---------------------------------------|-------|
| Оболочечное, ВО  | 53 | Волоконно-оптические пластиковые, ВОП | 32—73 |
| Сердцевинное, ВС | 92 |                                       |       |

Оптическая керамика, 300—400 К [43, 44]

|     |       |       |    |
|-----|-------|-------|----|
| KO1 | 113   | KO4   | 77 |
| KO2 | 69    | KЭО10 | 24 |
| KO3 | 109,9 | —     | —  |

Инфракрасные стекла, 293—393 К [3, 17, 43]

|       |     |           |       |
|-------|-----|-----------|-------|
| ИКС22 | 226 | Иртран-1  | 107   |
| ИКС23 | 246 | Иртран-2  | 66    |
| ИКС24 | 182 | Иртран-3  | 202*2 |
| ИКС25 | 220 | Иртран-4  | 77*2  |
| ИКС26 | 166 | Иртран-5  | 120*2 |
| ИКС27 | 177 | Иртран-51 | 115*2 |
| ИКС28 | 220 | KRS-5     | 580   |
| ИКС30 | 122 | KRS-6     | 560   |
| K515  | 82  | KRS-13    | 391*1 |

Резисторные стекла, 293—393 К [29]

|       |      |       |    |
|-------|------|-------|----|
| C27-1 | 27   | C74-1 | 74 |
| C36-1 | 36,5 | C77-1 | 77 |
| C41-1 | 41   | C84-2 | 84 |
| C63-1 | 63   | —     | —  |

Изоляторные стекла, 293—393 К [29]

|     |    |    |    |
|-----|----|----|----|
| 13В | 58 | N1 | 94 |
|-----|----|----|----|

Электровакуумные стекла [29], 293—373 К

|         |      |             |      |
|---------|------|-------------|------|
| C37-1   | 37,5 | C40-1*3     | 40,0 |
| C38-1*3 | 38,0 | C47-1*4     | 47,0 |
| C39-1*3 | 39,5 | C48-1*4     | 48,0 |
| C49-1*5 | 49,0 | C89-1*7     | 89,0 |
| C49-2*5 | 49,0 | C89-2       | 89,0 |
| C51-1*6 | 51,0 | C89-6       | 89,0 |
| C51-2*6 | 51,0 | C90-1       | 90,0 |
| C87-1*7 | 87,0 | Кварцевое   |      |
| C88-1*7 | 88,0 | (300—350 К) | 4,0  |
| C88-2   | 88,0 | (400—700 К) | 6,0  |

| Стекло | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-7} \text{ К}^{-1}$ | Стекло | $\alpha, \bar{\alpha},$<br>$10^{-7} \text{ К}^{-1}$ |
|--------|-----------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------|
|--------|-----------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------|

Термометрические стекла, 273—373 К [42]

|                   |      |     |      |
|-------------------|------|-----|------|
| ГОСТ 1224—41      | 80   | 600 | 33   |
| 59 <sup>III</sup> | 56,5 | 700 | 29,5 |

Лабораторные стекла, 300 К [42]

|              |      |               |      |
|--------------|------|---------------|------|
| Термостойкое | 33,2 | Щ23           | 65   |
| N13          | 50   | N 51-A        | 48   |
| N23          | 89   | Uninost       | 98   |
| N29          | 89,3 | Palax         | 64,9 |
| T16          | 50   | Murano 1922 N | 48   |
| T28          | 40   | G20           | 49   |
| Ц32          | 88,6 | Multal        | 50   |
| КС34         | 91   | Sial          | 50,6 |
| Щ14          | 87,1 |               |      |
| Щ26          | 57,3 |               |      |

Легированные стекла 373—573 К [29, 45]

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Алюмоборосиликатное             | 30—60  |
| Алюмоборосиликатное бесцелочное | 8—38   |
| Иттриевое                       | 171    |
| Кальций-алюмосиликатное         | 80—100 |
| Натрий-алюмосиликатное          | 87     |
| Фторбериллиевое СЛК-5           | 160    |
| Фторфосфатное № 436             | 165    |

Строительные стекла, 300—573 К [42]

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| Листовое оконное            | 80—95  |
| Молочное глушеное           | 83     |
| Пеностекло                  | 5—6    |
| Порошковое С25-1            | 25     |
| Порошковое С48-2            | 48     |
| Порошковое С84-8            | 89     |
| Сортовое бесцветное         | 90—99  |
| Стекло для труб             | 50     |
| Стекло для труб пререксовое | 32     |
| Стеклоцемент СЦ90-1         | 97     |
| Стекло цветное оптическое   | <70    |
| Хрустальное свинцовое       | 94—105 |
| Стеклоэмали                 | 70—120 |
| Микалес                     | 80—90  |

\*1 При 300 К.

\*2 В интервале 293—573 К.

\*3 Спаивается с W, H3OK13Д.

\*4 Спаивается с Мо, 29НК.

\*5 Спаивается с 29НК.

\*6 Спаивается с Мо.

\*7 Спаивается с Fe — Cr — Ni-сплавом.

Таблица 10.6. Средний температурный коэффициент линейного расширения ситаллов  $\bar{\alpha}$ ,  $10^{-7} \text{ K}^{-1}$  [29, 42, 44]

| Марка   | $\Delta T, \text{ K}$ |         |                   |         |         |         |
|---------|-----------------------|---------|-------------------|---------|---------|---------|
|         | 213—293               | 293—393 | 393—473           | 473—573 | 573—673 | 673—773 |
| СТЛ-1   | —12,5                 | —8      | —5,4              | —2,1    | 1,2     | 3,6     |
| СТЛ-2   | —10                   | —6      | —2,5              | 2,7     | 5,3     | 5,6     |
| СТЛ-3   | —2,5                  | 0,6     | 3                 | 0,5     | 6,5     | 9       |
| СТЛ-4   | —1,3                  | 2       | 5,3               | 7,3     | 13,6    | 15,9    |
| СТЛ-5   | —0,8                  | 5       | 5,6               | 6       | 7       | 19,5    |
| СТЛ-6   | 2,5                   | 7       | 8,8               | 11      | 13      | 14      |
| СТЛ-7   | 6,2                   | 12      | 12,5              | 13      | 15      | 16      |
| СТЛ-8   | 10                    | 16      | 16,2              | 16,5    | 17      | 18      |
| СТЛ-9   | —                     | 38,1    | 38,1              | 38,1    | 38,1    | 38,1    |
| СТЛ-10  | 80                    | 100     | 106,2             | 125     | 120     | 90      |
| СТМ-1   | 11                    | 27      | 31,2              | 32      | 34      | 37      |
| СТМ-2   | —                     | 44      | 51,2              | 56      | 56      | 57      |
| СТБ-1   | 27,5                  | 29      | 32,5              | 37      | 38      | 60      |
| СТБ-3   | 21                    | 30      | 31,2              | 33      | 48      | 88      |
| СО115М  | 0,0(1,5) (213—313 K)  |         | 2,5—6 (293—693 K) |         | 5,3     | —       |
| СО-21   | —                     | —       | —2,5(293—693 K)   |         | 6,5     | —       |
| СО-15   | —                     | —       | —                 | —       | 1,2     | —       |
| С-15-12 | —                     | —       | —                 | —       | —       | —       |

Таблица 10.7. Температурный коэффициент линейного расширения чугуна [3, 4, 5]. Приведены значения истинного ТКЛР  $\alpha$  (при данной температуре  $T$ ) или среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$  (в интервале  $\Delta T$ )

| Марка или название                     | $\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|
| СЧ 00, СЧ 10                           | 20                                 | 10,0                                           |
| СЧ 12-28, СЧ 15-32, СЧ 18-36, СЧ 21-40 | 20—200                             | 11,8                                           |
| СЧ 32-52                               | —77                                | 11,2                                           |
| ЖЧН15Д7Х2                              | 20                                 | 20,0                                           |
| АВЧ-1, АЧК-1                           | 20                                 | 11                                             |
| ЧМ 1,3, ЧМ 1,8                         | 20—100                             | 12,0                                           |
| ПЧ, ПЧИ, ХТВ, ХНВ                      | 20—600                             | 13,6                                           |
| Чугун:                                 |                                    |                                                |
| белый                                  | 20                                 | 7—11                                           |
|                                        | 20—100                             | 10                                             |
| серый                                  | 20                                 | 11                                             |
| ферритный кобкий                       | 20—100                             | 11                                             |
|                                        | 20—300                             | 12,3                                           |
|                                        | 20—500                             | 13,6                                           |
|                                        | 20—700                             | 14,7                                           |
| аустенитный                            | 20—100                             | 17                                             |
| никелевый (14 % Ni)                    | 20—600                             | 18,0                                           |
| хромистый (34,2 % Cr)                  | 20—600                             | 11,0                                           |
| Составляющие чугуна:                   |                                    |                                                |
| аустенит                               | 20—100                             | 17—24                                          |
| феррит                                 | 20—100                             | 12—12,5                                        |
| перлит                                 | 20—100                             | 10—11                                          |
| цементит                               | 20—100                             | 6—8,5                                          |
| графит                                 | 20—100                             | 7,5—8                                          |

Таблица 10.8. Температурный коэффициент линейного расширения сталей. Приведены значения среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$ ,  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , в интервале от 300 K до указанной температуры или значения истинного ТКЛР  $\alpha$ ,  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Марки сталей расположены в порядке увеличения содержания легирующих добавок

| Марка стали        | Температура, К |              |              |              |              |              |              |       |       |       | Литература |
|--------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|------------|
|                    | 373            | 473          | 573          | 673          | 773          | 873          | 973          | 1073  | 1173  | 1273  |            |
| Углеродистые стали |                |              |              |              |              |              |              |       |       |       |            |
| 3, 3кп (α)         |                | 5,50 (100 К) |              | 10,1 (200 К) |              | 11,8 (300 К) |              | —     | —     | —     | [5]        |
| 0,8кп (α)          | 11,6           | 12,32        | 13,02        | 13,65        | 14,22        | 14,64        | 15,01        | —     | —     | —     | [16]       |
| 10                 | 11,6           | 12,6         | 13,0         | 14,6         | —            | —            | —            | —     | —     | —     | [5]        |
| 15                 | 12,2           | 12,3         | 13,1         | 13,5         | 14,3         | 14,3         | 15,25        | 14,1  | 13,2  | 13,3  | [16]       |
| 20, 20кп           | 11,1           | 12,1         | 12,8         | 13,4         | 13,9         | 14,4         | 14,8         | 12,9  | —     | —     | [16]       |
| 25                 | 12,2           | 12,7         | 13,1         | 13,5         | 13,9         | 14,4         | 14,9         | —     | —     | —     | [16]       |
| 25Л (α)            | 11,5           | 12,9         | 13,0         | 13,2         | 13,5         | 13,8         | —            | —     | —     | —     | [16]       |
| 30 (α)             | 12,9           | 14,5         | 15,8         | 15,8         | 16,7         | 16,2         | 16,4 (923 К) | —     | —     | —     | [16]       |
| 35                 | 11,09          | 11,89        | 13,42        | 14,02        | 14,43        | —            | —            | —     | —     | —     | [16]       |
| 40                 | 11,21          | 13,0         | 13,0         | 13,58        | 14,05        | 14,58        | 14,58        | 11,85 | 12,65 | 13,59 | [16]       |
| 45                 | 11,59          | 12,32        | 13,09        | 13,71        | 14,18        | 14,68        | 15,08        | 12,50 | 13,56 | 14,45 | [16]       |
| 50 (α)             | 4,90 (100 К)   |              | 9,30 (200 К) |              | 10,9 (300 К) |              | —            | —     | —     | —     | [16]       |
|                    | 12,0           | 12,4         | 12,9         | 13,3         | 13,7         | 14,1         | 14,3         | 11,9  | 12,9  | 14,0  | [16]       |
| У8 (α)             | 12,1           | 14,0         | 12,8         | 16,1         | 16,8         | 17,8         | 19,8 (923 К) | —     | —     | —     | [16]       |
| У9 (α)             | 12,1           | 13,7         | 15,3         | 16,4         | 17,3         | 17,2         | 17,6 (923 К) | —     | —     | —     | [16]       |
| У12 (α)            | 11,7           | 13,3         | 15,4         | 16,2         | 17,1         | 18,3         | 18,9 (923 К) | —     | —     | —     | [16]       |

| Марка стали     | Температура, К |       |       |        |        |        |       |         |      |         | Лите-<br>ратура |
|-----------------|----------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|---------|------|---------|-----------------|
|                 | 373            | 473   | 573   | 673    | 773    | 873    | 973   | 1073    | 1173 | 1273    |                 |
| Хромистые стали |                |       |       |        |        |        |       |         |      |         |                 |
| 15X, 15XA, 20X  | 11,3           | 11,6  | 12,3  | 13,2   | 13,7   | 14,2   | —     | —       | —    | —       | [5]             |
| 30X             | 12,45          | 13,0  | 13,4  | 13,75  | 14,15  | 14,55  | 14,8  | 12,0    | 12,8 | 13,8    | [5]             |
| 38XA, 40X (z)   | —0,002         | (5 K) | 0,018 | (10 K) | 0,18   | 1,7    | —     | 6,6     | 11,5 | (200 K) | [46]            |
|                 |                |       |       |        | (20 K) | (50 K) |       | (100 K) |      |         |                 |
| 40X             | 13,4           | 13,3  | —     | 14,8   | —      | 14,8   | —     | —       | —    | —       | [5]             |
| OX13            | 10,5           | 11,1  | 11,4  | 11,8   | 12,1   | 12,3   | 12,5  | 12,8    | —    | —       | [5]             |
| 1X13            | 10,15          | 11,2  | 11,4  | 11,8   | 12,2   | 12,4   | 12,7  | 13,0    | 10,8 | 11,7    | [5]             |
| 2X13            | 10,2           | 11,2  | 11,5  | 11,9   | 12,2   | 12,8   | 12,8  | 13,0    | —    | —       | [5]             |
| 3X13            | 10,2           | 10,95 | 11,1  | 11,7   | 12,0   | 12,3   | 12,5  | 12,6    | 10,6 | 12,2    | [5]             |
| 4X13            | 10,65          | 11,5  | 11,85 | 12,2   | 12,5   | 12,75  | 12,95 | 13,2    | —    | —       | [5]             |
| ШХ15 (α)        | 14,0           | 15,1  | —     | 15,5   | —      | 15,7   | —     | —       | —    | —       | [5]             |
| 08X17           | 10,4           | 10,5  | 10,8  | 11,2   | 11,4   | 11,6   | 11,9  | 12,1    | —    | —       | [37]            |
| 9X18, 9X18Ш     | 11,7           | 12,1  | 12,4  | 12,9   | 13,3   | 11,8   | 12,1  | 12,4    | —    | —       | [5]             |
| X28             | 10,0           | —     | —     | —      | 11,1   | 11,3   | 11,5  | 12,0    | 12,4 | —       | [5]             |

*Хромоникельсодержащие низко- и среднелегированные стали*

|                 |             |      |               |      |              |      |              |      |              |      |         |
|-----------------|-------------|------|---------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|---------|
| 40XH, 45XH      | 11,8        | 12,3 | 13,4          | 14,0 | —            | —    | —            | —    | —            | —    | [5, 46] |
| 18XHBA          | 11,7        | 12,2 | 12,7          | 13,1 | 13,5         | 13,9 | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| 40XHMA          | 11,7        | 12,2 | 12,7          | —    | —            | —    | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| 35XHМ, 34XH1М   | 11,7        | 12,2 | 12,7          | —    | —            | —    | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| 12XH2           | 12,6        | 13,8 | 14,8          | 14,3 | —            | —    | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| 30XH2MΦA (α)    | 5,01 (70 K) | —    | 7,40 (100 K)  | —    | 9,30 (200 K) | —    | 12,3 (300 K) | —    | —            | —    | [3]     |
| 30XH3           | 11,2        | 11,8 | 12,4          | 12,7 | 13,2         | 13,5 | 13,9         | 10,8 | 12,1         | 13,1 | [5]     |
| 12XH3A          | 11,8        | 13,0 | 14,0          | 14,7 | 15,3         | 15,6 | —            | —    | —            | —    | [5, 46] |
| 20XH3A          | 11,0        | 12,0 | 13,0          | 13,5 | 14,0         | 14,5 | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| 33XH3MA, 34XH3M | 10,8        | 11,6 | 12,5          | 13,3 | 13,5         | 13,7 | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| 35XH3MΦ         | 11,8        | 12,1 | 12,6          | 13,0 | 13,4         | —    | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| OXH3M (α)       | 5,0 (70 K)  | —    | 7,60 (100 K)  | —    | 9,45 (200 K) | —    | 11,6 (300 K) | —    | —            | —    | [3]     |
| 12X2H4A         | 11,0        | 12,0 | 13,0          | 14,7 | —            | 15,6 | —            | —    | —            | —    | [5]     |
| 18X2H4MA (α)    | —0,06 (5 K) | —    | —0,064 (10 K) | —    | 0,32 (30 K)  | —    | 6,5 (100 K)  | —    | 10,0 (200 K) | —    | [3, 46] |
|                 | —           | 11,2 | 12,5          | 13,1 | 13,7         | 13,8 | 13,8         | —    | —            | —    | [50]    |

*Хромоникелевые стали с содержанием никеля меньше 20%*

|                 |                 |       |       |                |       |       |       |       |       |       |          |
|-----------------|-----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 13X12HB2MΦ      | 11,0            | 11,3  | 11,6  | 12,0           | 12,3  | 12,5  | —     | —     | —     | —     | [5]      |
| 4X12H8Г8MΦБ     | 16,0            | 16,9  | 17,7  | 18,5           | 19,5  | 19,9  | 20,2  | —     | —     | —     | [5]      |
| OX12H16BC4      | 16,45           | 16,7  | 17,4  | 17,65          | 17,85 | 18,1  | 18,3  | 18,55 | 18,65 | —     | [5]      |
| 2X13H2          | 10,54           | 10,64 | 10,64 | 10,84          | 11,09 | 11,34 | —     | —     | —     | —     | [5]      |
| 1X13H2C2        | 10,78           | 11,41 | 11,82 | 12,26          | 12,71 | 13,12 | 13,32 | —     | —     | —     | [5]      |
| 03X13H8L2TM     | 10,2 (77—300 K) | —     | —     | 8,5 (20—300 K) | —     | —     | —     | —     | —     | —     | [51, 52] |
| X13H12M2B2E1K10 | 15,6            | 15,8  | 16,5  | 16,9           | 17,1  | 17,3  | 17,7  | 18,0  | —     | 18,6  | [5]      |
| X13H13B2Б       | 16,8            | 17,3  | 17,9  | 18,3           | 18,7  | 18,9  | 19,1  | 19,3  | 19,6  | —     | [5]      |
| X13H13B2M2Б3K10 | 15,6            | 15,8  | 16,5  | 16,9           | 17,1  | 17,3  | 17,7  | 18,0  | 18,3  | 18,6  | [5]      |
| 1X13H16Б        | 16,05           | 16,9  | 17,7  | 18,25          | 18,55 | 18,75 | 19,0  | 19,25 | 19,6  | 19,65 | [5]      |
| 4X14H14B2M      | —               | —     | 17,0  | —              | 18,0  | —     | 18,0  | —     | 19,0  | —     | [5, 37]  |
| 1X14H14B2M      | 17,0            | 17,8  | 18,3  | 18,8           | 19,0  | 19,2  | 19,4  | 19,9  | 20,5  | —     | [5]      |
| 1X14H14B2MT     | 17,2            | 17,2  | 17,5  | 18,0           | 18,5  | 18,6  | 18,9  | 19,3  | —     | —     | [5]      |
| 2X14H14B2CT     | 16,1            | 16,7  | 17,2  | 17,4           | 17,8  | 18,2  | —     | —     | —     | —     | [5]      |
| X14H14MBΦБ      | 15,1            | 15,9  | 16,9  | 18,0           | 18,2  | 18,4  | 19,0  | —     | —     | —     | [5]      |
| X14H14M2B2ΦБТ   | —               | —     | —     | 16,7           | 17,1  | 17,4  | 17,8  | 18,1  | —     | —     | [5]      |
| 09X14H16Б       | 15,2            | 16,5  | 17,1  | 17,55          | 17,96 | 18,41 | 18,91 | 20,6  | —     | —     | [37]     |
| 1X14H18B2Б      | 16,5            | 17,4  | 17,6  | 18,0           | 18,1  | 18,2  | 18,5  | 19,0  | 19,0  | —     | [5]      |
| X14H18B2БP      | 15,9            | 16,5  | 17,2  | 17,6           | 18,0  | 18,3  | 18,6  | 18,7  | 19,0  | —     | [37]     |
| 09X14H19B2БP1   | 15,2            | 16,3  | 17,2  | 17,6           | 18,0  | 18,1  | 18,6  | 18,6  | —     | —     | [5, 37]  |
| 4X15HГ7Φ2MC (α) | 17,0            | 17,7  | 18,4  | 19,1           | 20,5  | 20,8  | —     | —     | —     | —     | [5, 36]  |
|                 | —               | —     | —     | —              | —     | —     | 22,8  | 22,78 | 23,32 | 24,64 | [5, 36]  |

| Марка стали     | Температура, К    |       |                    |       |                     |       |                |       |                |       | Лите-<br>ратура |
|-----------------|-------------------|-------|--------------------|-------|---------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-----------------|
|                 | 373               | 473   | 573                | 673   | 773                 | 873   | 973            | 1073  | 1173           | 1273  |                 |
| OX15H7M2Ю       | 9,9               | 10,8  | 11,1               | 11,5  | 11,7                | 11,4  | 10,3           | 11,2  | 11,9           | —     | [5]             |
| 1X15H9C3Б1 (α)  | 17,4              | 18,7  | 19,7               | 20,2  | 20,5                | 21,0  | 21,55          | 21,75 | —              | —     | [5]             |
| X15H15M2K3BT    | 15,75             | 16,6  | 17,15              | 17,6  | 18,25               | 18,6  | —              | —     | —              | —     | [5]             |
| OX15H15M3       | 16,9              | 17,7  | 18,1               | 18,5  | 18,8                | 19,1  | 19,45          | 19,7  | 19,9           | —     | [5]             |
| OX15H15M3Б      | 16,35             | 17,05 | 17,4               | 17,65 | 17,7                | 17,85 | 18,25          | 18,6  | 18,75          | —     | [5]             |
| X16H9M2         | 17,0              | 17,5  | 18,0               | 18,4  | 18,9                | 19,3  | 19,5           | —     | —              | —     | [5]             |
| 08X16H13M2Б     | —                 | —     | —                  | 17,1  | 17,4                | 17,8  | 18,2           | 18,6  | —              | —     | [37]            |
| X16H14Б         | 16,0              | —     | 18,0               | —     | 18,0                | —     | —              | 19,0  | —              | —     | [5]             |
| 1X16H16B3MBP    | 17,1              | 17,1  | 17,1               | 17,9  | 18,2                | 18,5  | 18,8           | 19,1  | 19,2           | —     | [5]             |
| 07X16H16        | —                 | 11,7  | 12,1               | 12,5  | 12,9                | —     | —              | —     | —              | —     | [5],<br>[52]    |
| X16H16B3MB      | 15,8              | 16,8  | 17,3               | 17,6  | 17,8                | 17,9  | 18,1           | 18,2  | —              | —     | [5]             |
| 2X17H1          | 8,1               | 8,76  | 10,26              | 10,04 | 10,54               | 11,54 | —              | —     | —              | —     | [52]            |
| 2X17H2          | 10,54             | 10,67 | 10,94              | 10,84 | 11,24               | 11,34 | —              | —     | —              | —     | [5]             |
| 1X17H2          | 10,3              | 10,4  | 10,7               | 11,1  | 11,8                | —     | —              | —     | —              | —     | [5]             |
| OX17H4          | 9,7               | 10,2  | 10,6               | 10,9  | 11,2                | 11,3  | 9,6            | 9,6   | 10,2           | —     | [5]             |
| OX17H4M2        | 10,6              | 11,0  | 11,4               | 11,6  | 11,9                | 11,7  | 11,1           | 11,7  | 12,3           | —     | [5]             |
| X17H5M2         | 12,14             | 13,69 | 14,28              | 14,64 | 14,79               | 14,84 | —              | —     | —              | —     | [5]             |
| OX17H13M2T      | 15,7              | 16,1  | 16,7               | 17,2  | 17,6                | 17,9  | 18,2           | —     | —              | —     | [3]             |
| OX18H7Ю1        | 15,6              | 16,5  | 17,3               | 17,9  | 18,1                | 18,4  | 18,5           | 18,7  | —              | —     | [5]             |
| X18H9           | 16,5              | 17,2  | 17,7               | 18,1  | 18,3                | 18,6  | 18,9           | 19,3  | 19,7           | 20,2  | [5, 37]         |
| X18H9B          | —                 | 16,5  | 17,1               | 17,6  | 18,0                | 18,4  | 18,8           | 19,0  | 19,2           | 19,4  | [5]             |
| 1X18H9BM        | —                 | —     | 16,65              | 17,15 | 17,45               | 17,8  | 18,0           | 18,2  | —              | —     | [5]             |
| 3X18H9B2ΦT      | 15,35             | 15,6  | 15,9               | 16,25 | 16,6                | 17,0  | 17,4           | 17,8  | 18,4           | 18,95 | [5]             |
| X18H9M          | 17,3              | 17,5  | 17,8               | 18,0  | 18,3                | 18,5  | 18,8           | —     | —              | —     | [5]             |
| X18H9M2C2       | 16,6              | 17,0  | 17,35              | 17,7  | 18,05               | 18,4  | 18,75          | 19,1  | 19,4           | 19,75 | [5]             |
| X18H9C2         | 16,2              | 17,1  | 17,8               | 18,6  | 19,2                | 19,2  | 20,5           | —     | —              | —     | [5]             |
| 12X18H9T (α)    | 0,8 (20K)         | —     | 3,3 (50 K)         | —     | 8,40 (100 K)        | —     | 14,30 (200 K)  | —     | 16,7 (300 K)   | —     | [3, 52]         |
| 12X18H10T (α)   | 17,55 (400K)      | —     | 17,99 (500 K)      | —     | 19,36 (700 K)       | —     | 21,10 (1000 K) | —     | 22,92 (1300 K) | —     | [60]            |
| X18H9T          | 16,6              | 17,0  | 17,6               | 18,0  | 18,3                | 18,55 | 18,9           | 19,25 | 19,5           | 20,1  | [5]             |
| X18H9TЛ         | 14,8              | 16,0  | 16,9               | 17,1  | 17,6                | 18,0  | 18,4           | —     | —              | —     | [5]             |
| 04X18H10 (α)    | 3,0<br>(20 K)     | —     | 8,0 (50 K)         | —     | 10,8 (100 K)        | —     | 15,4 (200 K)   | —     | 15,5 (300 K)   | —     | [46]            |
| X18H11Б         | 16,8              | 17,65 | 18,2               | 18,5  | 18,85               | 19,0  | 19,4           | 19,65 | 19,9           | —     | [5]             |
| X18H12          | 16,8              | 17,2  | 17,6               | 17,8  | 18,2                | 18,5  | 18,8           | —     | —              | —     | [37]            |
| OX18H12Б        | 16,0              | 18,0  | 18,0               | 19,0  | —                   | —     | —              | —     | —              | —     | [5]             |
| X18H12M2T       | 15,7              | 16,1  | 16,7               | 17,2  | 17,6                | 17,9  | 18,2           | —     | —              | —     | [5]             |
| X18H12MΦTP      | 15,9              | 16,9  | 17,6               | 17,8  | 17,9                | 18,4  | 18,8           | 19,0  | 19,2           | —     | [5]             |
| X18H12M3        | 16,0              | —     | 16,2               | —     | 17,5                | 18,6  | —              | —     | —              | 20,0  | [5]             |
| X18H12T         | 16,6              | 17,0  | 17,2               | 17,5  | 17,9                | 18,2  | 18,6           | 18,9  | 19,3           | —     | [5]             |
| X18H14M2Б1      | —                 | —     | —                  | 17,6  | 17,8                | 18,2  | 18,7           | —     | —              | —     | [5]             |
| X18H15M3БЮP2    | 14,95             | 16,15 | 16,8               | 17,1  | 17,5                | 17,75 | 18,15          | 18,35 | 18,25          | —     | [5]             |
| X18H15M3БЮP4    | 15,05             | 15,75 | 16,4               | 17,15 | 17,35               | 17,6  | 17,85          | 18,1  | 18,45          | —     | [5]             |
| 1X18H15M3B2BK13 | —                 | —     | 16,7               | 16,7  | 16,75               | 17,0  | 17,25          | 17,4  | —              | —     | [5]             |
| OX18H15P4       | 16,5              | 17,4  | 17,8               | 18,15 | 18,45               | 18,85 | 19,2           | 19,45 | 19,8           | —     | [5]             |
| OX18H15P7       | 16,8              | 17,4  | 17,7               | 18,05 | 18,2                | 18,55 | 18,95          | 19,4  | 19,8           | —     | [5]             |
| 10X18H18Ю4Л     | 15,5              | 16,5  | 17,0               | 17,4  | 17,65               | 18,2  | 18,4           | 18,8  | 18,6           | —     | [37]            |
| 3X19H9MBBT      | 16,65             | 16,9  | 17,2               | 17,5  | 17,8                | 18,15 | 18,5           | 18,9  | 19,3           | 19,7  | [5]             |
| X19H10M2Φ3BK47  | 14,8              | 15,0  | 15,1               | 15,2  | 15,3                | 15,9  | 16,4           | 16,8  | 17,2           | —     | [5]             |
| X19H14Б2        | 17,0              | 17,2  | 17,4               | 17,6  | 17,9                | 18,6  | 18,8           | —     | —              | —     | [5]             |
| 2X20H11         | 17,3              | —     | 17,8               | —     | 18,4                | 18,7  | —              | —     | —              | —     | [5]             |
| X20H14C2        | 16,0              | —     | —                  | —     | —                   | 18,1  | 18,3           | 18,5  | 18,8           | 19,0  | [5]             |
| O3X20H16AГ6 (α) | 0,01              | 4 (K) | 0,06 (20 K)        | —     | 0,57 (40 K)         | —     | 8,27 (100 K)   | —     | 16,10 (300 K)  | —     | [51, 52]        |
| 07X21H5AГ7      | 9,3<br>(20—300 K) | —     | 11,5<br>(77—300 K) | —     | 14,6<br>(173—300 K) | —     | —              | —     | —              | —     | [51]            |

| Марка стали       | Температура, К |              |              |      |      |       |       |      |      |      | Лите-<br>ратура |
|-------------------|----------------|--------------|--------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-----------------|
|                   | 373            | 473          | 573          | 673  | 773  | 873   | 973   | 1073 | 1173 | 1273 |                 |
| OX21H5T           | 15,7           | 16,0         | 16,8         | 17,3 | 18,0 | 18,4  | 18,5  | —    | —    | —    | [52]            |
| 12X21H5T (α)      | 9,6            | 13,8         | 16,0         | 16,0 | 16,4 | 16,2  | 16,5  | 16,7 | 17,1 | —    | [5]             |
| 1X21H5T           | 7,90 (100 K)   | 10,4 (200 K) | 11,0 (300 K) | —    | —    | —     | —     | —    | —    | —    | [3]             |
| OX21H6M2T         | 10,2           | 14,4         | 16,8         | 16,8 | 17,4 | 17,5  | 17,7  | 18,0 | 18,5 | —    | [5]             |
| X22H9             | 9,5            | 13,8         | 16,0         | 16,0 | 16,3 | 16,7  | 17,1  | 17,1 | 17,4 | —    | [5]             |
|                   | —              | —            | —            | 17,5 | —    | —     | —     | 18,5 | —    | —    | [5]             |
| 20X23H18          | 14,9           | 15,7         | 16,6         | 17,3 | 17,5 | 17,85 | 17,85 | —    | —    | —    | [3, 37]         |
| X25H13AT, X25H13T | —              | —            | —            | —    | 17,1 | —     | —     | —    | 18,1 | —    | [5]             |
| 12X25H16Г17AP     | 16,6           | 16,2         | 16,8         | 17,4 | 18,0 | 18,5  | 18,7  | 18,9 | —    | —    | [37]            |

## Хромоникелевые стали и сплавы с содержанием никеля более 20%

|                     |              |                   |              |       |                   |       |                    |                   |               |         |
|---------------------|--------------|-------------------|--------------|-------|-------------------|-------|--------------------|-------------------|---------------|---------|
| 10X11H20T3P         | 15,9         | 16,4              | 17,2         | 17,9  | 18,4              | 18,9  | 19,2               | 8,15              | (173—300 K)   | [5, 51] |
| 00X18H20C3M3Д3Б (α) | —0,25 (10 K) | —                 | 0,61 (30 K)  | —     | 5,95 (70 K)       | —     | 14,3 (200 K)       | 15,8 (300 K)      | —             | [3]     |
| 3X20H20M4B4K45      | —            | —                 | 11,8         | 12,4  | 12,7              | 13,0  | 13,5               | 14,0              | 14,4          | [5]     |
| X20H20B1M3K20       | —            | —                 | —            | 15,7  | 16,1              | 16,65 | 17,2               | 17,6              | 17,8 (1223 K) | [5]     |
| X25H20C2            | 16,1         | —                 | —            | —     | —                 | 17,8  | 17,8               | 18,1              | 18,5          | [5]     |
| X26H20Л             | —            | —                 | 15,5         | 15,6  | 15,9              | 16,2  | 16,6               | 17,2              | —             | [5]     |
| X18H22B2T2 (α)      | 15,34        | 15,95             | 17,01        | 17,11 | 17,23             | 17,52 | —                  | —                 | —             | [5]     |
| 10X11H23T3MP (α)    | 0,03 (5 K)   | —                 | 0,14 (30 K)  | —     | 1,46 (50 K)       | —     | 9,10 (100 K)       | 16,0 (300 K)      | —             | [46]    |
| 08X15H24B4TP (α)    | —0,12 (4 K)  | —                 | —0,42 (30 K) | —     | 5,18 (70 K)       | —     | 8,48 (100 K)       | 15,6 (300 K)      | —             | [46]    |
| X15H24B4T           | 14,5         | 15,5              | 16,3         | 16,8  | 17,2              | 17,3  | 17,9               | 18,5              | —             | [5]     |
| X15H24T2 (α)        | 3,60 (70 K)  | —                 | 5,85 (100 K) | —     | 14,3 (200 K)      | —     | 16,4 (300 K)       | —                 | —             | [3]     |
| 1X16H25M6           | 15,0         | 15,7              | 15,9         | 16,3  | 16,6              | 16,9  | 17,1               | —                 | —             | [5]     |
| 36X18H25C2          | 13,0         | 13,6              | 14,7         | 16,1  | —                 | —     | —                  | —                 | —             | [5]     |
| X25H25TP            | 12,95        | 14,35             | 15,2         | 15,65 | 16,15             | 16,5  | 17,25              | 17,30             | 17,75         | [5]     |
| XH30MBЮ (α)         | —0,14 (4 K)  | —                 | 0,21 (10 K)  | —     | 1,9 (50 K)        | —     | 8,2 (100 K)        | 14,5 (293 K)      | —             | [51]    |
| 1X15H30T2           | —            | —                 | —            | 16,1  | 16,7              | 16,9  | 17,5               | —                 | —             | [5]     |
| XH32T               | 13,7         | 15,6              | 17,2         | 18,0  | 18,0              | 18,4  | 18,9               | 19,0              | —             | [37]    |
| XH35BT              | 14,8         | 15,1              | 15,5         | 15,9  | 16,1              | 16,6  | 16,9               | 17,7              | —             | [37]    |
| XH35BTЮ             | 12,7         | 14,1              | 15,0         | 15,4  | 15,8              | 16,0  | 16,6               | 16,8              | 18,4          | [5, 37] |
| X15H35B2M2TP        | 13,0         | —                 | —            | 15,0  | 16,0              | 16,2  | 16,85              | 16,9              | —             | [5]     |
| X15H35B3TK4         | —            | 14,8              | 15,2         | 15,65 | 16,1              | 16,5  | 17,05              | —                 | —             | [5]     |
| X15H35B5TP          | 14,1         | —                 | —            | 15,8  | 16,2              | 16,2  | 16,7               | 16,9              | —             | [5]     |
| 1X16H36MBТЮP        | 17,73        | 14,02 (373—473 K) | —            | —     | 16,95 (673—773 K) | —     | 24,96 (973—1073 K) | —                 | —             | [5]     |
| X26H36K30MB         | —            | —                 | 13,5         | 13,9  | 14,3              | 14,7  | 15,1               | 15,5              | 16,0          | [5]     |
| X16H38B3T           | 13,7         | 14,5              | 15,7         | 16,2  | 16,3              | 16,6  | 17,1               | 17,1              | 17,3          | [5]     |
| OX17H39Б            | 14,2         | 16,0              | 17,2         | 17,2  | 17,2              | 17,5  | 17,8               | —                 | —             | [5]     |
| 04XH40MДТЮ          | 8,15         | 11,0              | 12,0         | 12,8  | 13,6              | 14,1  | 19,9               | 16,2              | —             | [51]    |
| OX21H40BP           | 14,3         | 15,4              | 15,8         | 15,9  | 16,0              | 16,3  | 16,8               | 17,1              | —             | [5]     |
| X12H42MBT3          | 14,0         | —                 | —            | —     | 15,1              | —     | —                  | 17,0 (300—1023 K) | —             | [5]     |
| XH45Ю               | 15,8         | 15,9              | 15,95        | 16,55 | —                 | 16,6  | —                  | 19,0              | 19,7          | [37]    |
| X15H45K28M3T2Ю3     | 12,3         | —                 | —            | —     | 14,3              | —     | —                  | —                 | 17,0          | [5]     |
| X22H45M9            | 13,9         | —                 | —            | —     | —                 | —     | —                  | —                 | —             | [5]     |
| OX20H46Б            | 13,33        | 14,2              | 16,0         | 17,7  | 17,7              | 18,5  | 19,45              | 19,8              | —             | [5]     |
| X15H51K20M5Ю5       | 11,9         | —                 | —            | —     | 14,3              | —     | —                  | —                 | 17,7          | [5]     |
| X11H54K2M5ЮT2       | 12,4         | 13,1              | 13,6         | 14,0  | 14,3              | 14,5  | 15,0               | 15,7              | 16,8          | [5]     |
| X20H54K16T2Ю1       | 12,4         | —                 | —            | —     | 14,7              | —     | —                  | —                 | 17,4          | [5]     |
| X11H55M5K20T1       | 12,4         | —                 | —            | —     | —                 | —     | —                  | —                 | —             | [5]     |
| X19H55K10M10T2Ю1    | 14,0         | —                 | —            | —     | 14,7              | —     | —                  | —                 | 18,8          | [5]     |



| Марка стали     | Температура, К |            |       |       |             |       |       |             |       |       | Лите-<br>ратура |
|-----------------|----------------|------------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|-----------------|
|                 | 373            | 473        | 573   | 673   | 773         | 873   | 973   | 1073        | 1173  | 1273  |                 |
| XH55BMKЮ        | 11,8           | 12,2       | 12,7  | 13,1  | 13,4        | 13,6  | 14,1  | 14,8        | 15,7  | 17,0  | [37]            |
| XH55BMTKЮ       | 10,8           | 11,7       | 12,4  | 12,8  | 13,4        | 13,8  | 14,1  | 14,5        | 15,5  | —     | [37]            |
| XH55MBЮ         | 10,0           | (20—300 К) |       | 13,55 | (200—300 К) |       | 14,1  | (260—300 К) |       | —     | [51]            |
| XH55MBЮ         | —              | —          | 14,1  | 14,3  | 14,5        | 15,1  | 15,5  | 16,3        | 16,3  | —     | [51]            |
| XH55MBЮ         | 13,4           | 14,2       | 14,9  | 15,2  | 15,8        | 16,2  | —     | 17,3        | 18,8  | —     | [37]            |
| XH56MBTЮ        | 11,7           | 12,0       | 12,4  | 12,7  | 13,0        | 13,5  | 13,8  | 14,5        | 15,2  | —     | [37]            |
| X10H56K20M5T4Ю5 | 11,7           | —          | —     | —     | 14,0        | —     | —     | —           | 16,2  | —     | [5]             |
| X20H56K18T2Ю1,5 | 11,6           | 12,6       | 12,7  | 13,5  | 13,7        | 14,2  | 15,0  | 16,0        | 17,0  | —     | [5]             |
| XH57MBTЮ        | 12,6           | 13,6       | 14,7  | 15,0  | 15,3        | 15,8  | 16,2  | 17,3        | 18,2  | —     | [37]            |
| X16H57M17B4     | —              | —          | —     | —     | 13,3        | —     | —     | —           | 11,8  | —     | [5]             |
| X15H58M16       | 11,3           | —          | —     | —     | —           | —     | —     | —           | —     | 15,3  | [5]             |
| X20H58M10K10    | 12,5           | —          | —     | —     | 14,3        | —     | —     | —           | 16,5  | —     | [5]             |
| X20H59K16T2Ю1   | 12,8           | —          | —     | —     | 15,1        | —     | —     | —           | 17,9  | —     | [5]             |
| XH60B           | 12,7           | 13,2       | 13,6  | 14,1  | 14,5        | 15,5  | 15,7  | 16,0        | 16,2  | 16,8  | [37]            |
| XH60KMBЮБ       | 11,3           | 12,0       | 12,6  | 13,2  | 13,5        | 13,8  | 14,4  | 15,3        | 16,1  | —     | [37]            |
| XH60Ю           | 12,28          | 13,08      | 13,42 | 14,2  | 14,22       | 14,59 | 15,11 | 15,18       | 15,88 | —     | [37]            |
| X16H60Ю3        | 12,3           | 13,1       | 13,4  | 14,2  | 14,40       | 14,6  | 15,1  | 15,2        | 15,9  | —     | [5]             |
| OX20H60B        | 12,55          | 13,6       | 14,4  | 14,8  | 15,1        | 15,5  | 15,6  | 16,2        | 16,7  | —     | [5]             |
| XH62BMBKTЮБ     | 13,5           | 13,5       | 13,5  | 13,6  | 13,6        | 13,9  | 14,5  | 15,6        | —     | —     | [37]            |
| XH62MBBЮ        | 12,0           | 12,8       | 13,3  | 13,5  | 13,8        | 14,5  | 14,8  | 15,5        | 16,4  | 17,3  | [37]            |
| XH62MKOK10      | 11,49          | 12,57      | 13,03 | 13,37 | 13,68       | 13,98 | 14,33 | 14,75       | 15,56 | 16,9  | [37]            |
| XH65BMTЮ        | 11,5           | —          | 12,3  | 12,75 | 13,0        | 13,2  | 14,0  | 14,3        | 15,0  | —     | [37]            |
| XH67BMTЮ        | 12,0           | 12,3       | 13,5  | 13,6  | 14,4        | 14,8  | 15,2  | 16,2        | —     | —     | [37]            |
| X18H67B5M5T2ЮP  | 10,4           | 11,1       | 11,7  | 12,0  | 12,5        | 12,8  | 13,6  | 13,8        | 14,9  | —     | [5]             |
| XH70BMTЮ        | 12,0           | 12,5       | 13,5  | 13,9  | 14,3        | 14,8  | 15,8  | 16,3        | 16,7  | —     | [37]            |
| XH70BMTЮФ       | 10,4           | 11,7       | 12,4  | 12,9  | 13,2        | 13,6  | 14,0  | 14,5        | 15,0  | —     | [37]            |
| XH70BMЮ         | 10,2           | 11,3       | 12,0  | 12,2  | 12,4        | 12,6  | 13,1  | 13,2        | 14,0  | 15,1  | [37]            |
| XH70BMЮT        | 12,2           | 12,65      | 13,2  | 13,6  | 14,1        | 14,55 | 15,1  | 15,8        | —     | —     | [37]            |
| X15H70B6M3T2ЮP  | 12,4           | 12,8       | 13,05 | 13,3  | 13,6        | 14,0  | 14,6  | 15,25       | 16,1  | 17,35 | [5]             |
| X15H70B5M4Ю2TP  | 12,2           | 12,6       | 13,2  | 13,6  | 14,1        | 14,5  | 15,1  | 15,8        | 16,5  | —     | [5]             |
| X27H70Ю3        | —              | —          | —     | —     | —           | —     | —     | —           | —     | 18    | [5]             |
| X13H71M5B2T1ЮБ  | 11,9           | —          | —     | —     | 12,6        | —     | —     | —           | 14,5  | —     | [5]             |
| X15H73T2Ю1Б     | —              | —          | 13,1  | 14,0  | 14,5        | 14,9  | 15,6  | 16,4        | —     | —     | [5]             |
| X15H73T3Ю1Б1    | 13,7           | 13,9       | 14,2  | 14,4  | 14,6        | 15,0  | 15,4  | 16,2        | 16,8  | —     | [5]             |
| X20H75TЮ        | 12,2           | 13,0       | 13,4  | 13,8  | 14,1        | 14,7  | 15,4  | 15,5        | 16,0  | —     | [5]             |
| XH77TЮP         | 12,67          | 12,9       | 13,3  | 13,8  | 14,2        | 14,6  | 15,1  | 15,5        | 16,2  | 16,8  | [37]            |
| X20H77T2Ю       | 11,9           | 12,7       | 13,0  | 13,5  | 13,7        | 14,0  | 14,5  | 15,1        | 15,8  | —     | [5]             |
| XH78T           | 12,2           | 13,0       | 13,4  | 13,8  | 14,1        | 14,7  | 15,4  | 15,5        | —     | —     | [37]            |
| X16H80TBЮ       | 13,3           | 13,5       | 13,85 | 14,2  | 14,5        | 14,9  | 15,5  | 16,15       | 16,7  | 17,8  | [5]             |
| X20H80T         | 11,8           | 12,9       | 12,9  | 14,4  | 14,8        | 15,8  | 16,1  | 16,50       | 16,8  | —     | [5]             |
| X20H80T3        | 11,9           | 12,7       | 13,0  | 13,5  | 13,7        | 14,0  | 14,5  | 15,1        | 15,8  | —     | [5]             |
| X20H80          | —              | —          | —     | —     | —           | —     | —     | —           | —     | 17,6  | [5]             |
| X22H47M9        | 13,8           | —          | —     | —     | 14,9        | —     | —     | —           | 16,8  | —     | [5]             |

## Хромомолибденовые стали

|             |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |         |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|---------|
| 12XM, 12MX  | 11,2  | 12,5  | 12,7  | 12,9  | 13,2  | 13,5  | 13,8 | —     | —     | —     | [5]     |
| 15XM        | 12,2  | 12,95 | 13,3  | 13,7  | 14,0  | 14,3  | 14,5 | 13,35 | 11,15 | 12,45 | [5]     |
| 20XM        | 11,8  | 12,5  | 13,0  | 13,6  | 14,0  | 14,3  | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 20XMЛ       | 10,9  | 12,4  | 12,8  | 13,1  | 13,6  | 13,9  | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 20XMФЛ      | 10,0  | 11,9  | 12,9  | 13,1  | 13,5  | 13,8  | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 30XM, 30XMA | 11,6  | 12,5  | 13,2  | 13,8  | 14,3  | —     | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 34XM, 35XM  | 12,3  | 12,6  | 13,3  | 13,9  | 14,3  | 14,6  | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 35XMФА      | 11,8  | 12,5  | 12,7  | 13,0  | 13,4  | 13,7  | 14,0 | —     | —     | —     | [5]     |
| 38XMЮА      | 12,3  | 13,1  | 13,3  | 13,5  | 13,5  | 13,8  | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 12X1MФ      | 12,4  | 13,0  | 13,6  | 14,0  | 14,4  | 14,7  | 14,9 | 14,8  | 12,0  | —     | [5]     |
| 15X1M1Ф     | 11,2  | 11,7  | 12,5  | 13,0  | 13,5  | 13,7  | —    | —     | —     | —     | [5, 37] |
| 15X1M1ФK1P  | 12,1  | 12,5  | 13,1  | 13,8  | 14,6  | 14,9  | 14,6 | —     | —     | —     | [5]     |
| 20X1M1Ф1TP  | —     | 12,0  | 12,3  | 12,85 | 13,0  | 13,55 | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 20X1M1Ф     | 12,05 | 12,4  | 12,85 | 13,15 | 13,45 | 13,8  | 13,9 | 14,25 | 12,65 | —     | [5]     |
| 25X1MФ      | 11,3  | 11,7  | 12,8  | 13,2  | 14,2  | 14,4  | —    | —     | —     | —     | [5]     |
| 25X1M1Ф     | 10,9  | 12,0  | 12,7  | 13,65 | 13,7  | 13,8  | 14,0 | —     | —     | —     | [5]     |

| Марка стали    | Температура, К |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Лите-<br>ратура |
|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
|                | 373            | 473   | 573   | 673   | 773   | 873   | 973   | 1073  | 1173  | 1273  |                 |
| 1Х2М           | 12,1           | 12,3  | 12,8  | 13,2  | 13,8  | 14,0  | —     | —     | —     | —     | [5]             |
| 12Х2МБ, 1Х2МФБ | 12,3           | 12,4  | 12,6  | 12,6  | 13,3  | 13,5  | —     | —     | —     | —     | [5]             |
| 12Х2МФСР       | 11,85          | 12,9  | 13,55 | 13,95 | 14,35 | 14,8  | 15,15 | 15,5  | 12,4  | —     | [5]             |
| 15Х2М2ФБС      | 11,5           | 12,3  | 12,9  | 13,4  | 13,8  | 14,3  | 14,6  | 14,9  | 13,0  | —     | [5]             |
| 25Х2М1Ф        | 12,5           | 12,9  | 13,3  | 13,7  | 14,0  | 14,7  | —     | —     | —     | —     | [5]             |
| Х3МВФБ         | 10,6           | 11,45 | 12,3  | 12,65 | 13,1  | 13,35 | 13,4  | 13,1  | 11,45 | 10,35 | [5]             |
| Х5М            | 11,3           | 11,6  | 11,9  | 12,2  | 12,3  | 12,5  | —     | —     | —     | —     | [5]             |
| 10Х7МВФБР      | 10,25          | 11,6  | 12,4  | 12,75 | 13,25 | 13,6  | 13,4  | —     | —     | —     | [37]            |
| 15Х11МФ        | 10,3           | 10,6  | 10,8  | 11,3  | 11,7  | 12,0  | 12,2  | 12,4  | —     | —     | [37]            |
| 18Х11МФБ       | 10,3           | 10,6  | 10,8  | 11,3  | 11,7  | 11,8  | 12,0  | 12,4  | —     | —     | [37]            |
| 12Х12МВФБР     | 11,15          | 11,13 | 11,42 | 11,8  | 12,0  | 12,15 | 12,15 | 12,65 | 11,6  | —     | [37]            |
| 12Х12МВФБ      | 10,25          | 11,6  | 11,6  | 11,6  | 13,85 | 12,7  | 14,95 | 10,5  | 13,85 | —     | [37]            |
| 12Х13М2С2      | 10,5           | 11,2  | 12,0  | 12,3  | 12,5  | 12,8  | 13,0  | 13,5  | 14,1  | 13,9  | [5]             |
| 1Х13М2С1       | 10,2           | 10,8  | 11,3  | 11,7  | 12,0  | 12,4  | 12,6  | 13,0  | 13,0  | 13,6  | [5]             |
| 1Х13М2ФБР      | 9,7            | 10,6  | 11,5  | 11,6  | 11,8  | 12,2  | 12,2  | 12,6  | 12,4  | 12,6  | [5]             |
| 15М, 16М, 20М  | 12,0           | 12,6  | 13,2  | 13,7  | 14,2  | 14,7  | —     | —     | —     | —     | [5]             |

## Марганцевые и хромомарганцевые стали

|                 |               |              |              |               |               |       |               |
|-----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|-------|---------------|
| 20Г (α)         | 0,3 (30 K)    | 5,80 (100 K) | 10,0 (200 K) | 11,9 (300 K)  | —             | —     | [3]           |
| 22ГК            | 10,5          | 11,8         | 12,6         | 13,1          | 13,7          | 14,0  | —             |
| 50Г             | 11,6          | 11,8         | 12,8         | 13,8          | 14,2          | 14,6  | —             |
| 65Г             | 11,11         | 11,9         | 12,9         | 13,5          | —             | 14,6  | —             |
| 30Г2            | 11,9          | 12,7         | 13,4         | 13,9          | 14,3          | 14,7  | 15,1          |
| 14Г2АФ (α)      | 0,035 (4,3 K) | 0,23 (20 K)  | 9,05 (100 K) | 14,35 (200 K) | 15,85 (300 K) | —     | 13,7          |
| Г13             | 18,0          | 19,35        | 20,7         | 21,7          | 20,75         | 19,85 | 14,5          |
| 20ХГНР          | —             | 11,7         | 12,7         | 13,5          | 14,0          | 14,3  | 15,85 (300 K) |
| 25ХГСА          | 13,15         | 13,9         | 14,05        | 14,3          | 14,85         | 14,9  | 23,45         |
| 30ХГСА (α)      | 7,60 (50 K)   | 9,47 (100 K) | —            | —             | —             | —     | 23,15         |
| Х12Г20Ф         | 12,0          | 12,5         | 12,9         | 13,2          | 13,6          | 13,9  | —             |
| 03Х13АГ19 (α)   | 15,4          | 16,9         | 17,5         | 18,2          | 18,9          | 19,7  | —             |
|                 | 0,05 (10 K)   | 0,4 (40 K)   | 4,0 (100 K)  | 7,4 (200 K)   | 14,4 (300 K)  | —     | —             |
|                 | 13,85         | 16,80        | 18,70        | 19,40         | 20,40         | 21,80 | —             |
| 07Х13АГ20Н4 (α) | —0,2 (20 K)   | 3,0 (77 K)   | 15,3 (293 K) | —             | —             | —     | —             |
| Х14Г14Н3Т       | 16,0          | 16,8         | 17,6         | 18,3          | 19,0          | 19,5  | —             |
| 10Х14Г14Н4Т (α) | 0,502 (20 K)  | 5,05 (100 K) | 9,20 (200 K) | —             | —             | —     | —             |
|                 | 15,3          | 15,8         | 18,9         | 19,05         | 19,07         | 20,02 | —             |
| Х15Г21Т         | 15,3          | 16,6         | 17,8         | 18,9          | 19,6          | 20,3  | —             |
| 12Х17Г9АН4 (α)  | 3,60 (50 K)   | 9,05 (100 K) | 14,1 (200 K) | —             | —             | —     | —             |
| 07Х21Г7АН5 (α)  | —0,03 (4 K)   | —0,13 (20 K) | 3,05 (70 K)  | 5,75 (100 K)  | 14,6 (300 K)  | —     | —             |
|                 |               |              |              |               |               |       | 15,7 (300 K)  |

## Хромовольфрамовые стали

|              |       |       |       |       |       |      |       |      |      |       |     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-----|
| 28ХВФЦ       | 11,8  | 12,1  | 12,8  | 12,85 | 13,2  | —    | —     | —    | —    | —     | [5] |
| 38ХВФЮА      | 12,25 | 12,9  | 13,1  | 13,35 | 13,75 | 14,1 | 14,45 | 14,1 | 11,6 | —     | [5] |
| 3ХВ8Ф (α)    | 11,2  | —     | —     | —     | —     | —    | —     | —    | —    | —     | [5] |
| 20Х3ВМФ      | —     | —     | —     | 12,3  | 12,75 | 13,8 | —     | —    | —    | —     | [5] |
| 4Х4ВМФС (α)  | 11,44 | —     | —     | —     | —     | —    | —     | —    | —    | —     | [5] |
| 4Х4ВМФСЦ (α) | 11,62 | —     | —     | —     | —     | —    | —     | —    | —    | —     | [5] |
| Х11В2НМФ     | 10,5  | 11,2  | 11,9  | 12,6  | 12,8  | 13,1 | —     | —    | —    | —     | [5] |
| 18Х12ВМБФР   | 11,5  | 11,13 | 11,42 | 11,8  | 12,0  | 12,5 | 12,65 | 11,6 | —    | —     | [5] |
| 15Х12ВНМФ    | 10,0  | 10,5  | 10,7  | 11,0  | 11,2  | 11,5 | 11,6  | 11,8 | 10,7 | 11,65 | [5] |
| Х12В2МФ      | 10,8  | —     | —     | —     | —     | 13,5 | —     | —    | —    | —     | [5] |

## Хромованадиевые стали

|           |       |      |      |      |      |      |      |      |       |       |     |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|
| 15ХФ      | 11,9  | 12,4 | 13,1 | 13,7 | 14,2 | 14,5 | 14,9 | —    | —     | —     | [5] |
| 40ХФА     | 11,0  | —    | 12,9 | —    | —    | 14,5 | —    | —    | —     | —     | [5] |
| 50ХФА     | 11,8  | 12,4 | 13,1 | 13,6 | 13,9 | 14,1 | —    | —    | —     | —     | [5] |
| 12Х2ФБ    | 11,5  | 12,2 | 12,4 | 12,9 | 13,2 | 13,4 | 13,5 | —    | —     | —     | [5] |
| 70Х4Ф1В18 | 11,25 | 11,7 | 12,0 | 12,2 | 12,4 | 12,6 | 12,8 | 12,9 | 11,35 | 12,45 | [5] |

| Марка стали                            | Температура, К |       |                      |       |            |       |            |            |       |             | Лите-<br>ратура |
|----------------------------------------|----------------|-------|----------------------|-------|------------|-------|------------|------------|-------|-------------|-----------------|
|                                        | 373            | 473   | 573                  | 673   | 773        | 873   | 973        | 1073       | 1173  | 1273        |                 |
| Хромокобальтовые стали и сплавы        |                |       |                      |       |            |       |            |            |       |             |                 |
| 15К, 20К                               | —              | 12,0  | 12,8                 | 13,2  | 13,5       | 13,85 | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| 22К, 25К (α)                           | —              | 12,2  | 13,0                 | 13,3  | 13,9       | —     | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| ВЗК стеллит, напла-<br>вочный материал | —              | —     | —                    | —     | —          | 14,0  | —          | —          | —     | 16,0        | [5]             |
| 03Х9К14Н6МЗД (α)                       | 0,03 (4К)      | —     | —0,08 (9К)           | —     | 0,3 (20 К) | —     | 4,4 (70 К) | 7,4 (110К) | —     | 13,2 (300К) | [51,52]         |
| 40К19Х14Н20М4В4Б4                      | —              | —     | 14,25                | 14,5  | 14,75      | 15,1  | 15,4       | 15,75      | —     | —           | [5]             |
| 15К20Х20Н20М3В2Б                       | —              | —     | 15,55                | 15,95 | 16,3       | 16,65 | 17,05      | 17,55      | —     | —           | [5]             |
| 40К20Х20Н20М4В4Б4                      | —              | —     | 15,15                | 15,25 | 15,35      | 15,45 | 15,7       | 16,1       | 16,65 | —           | [5]             |
| 40К30Х20Н20М8В4                        | —              | —     | 13,7                 | 14,2  | 14,65      | 15,05 | 15,45      | 15,95      | 16,55 | —           | [5]             |
| 75К41Х23Н20В12                         | —              | —     | 14,2                 | 14,3  | 14,55      | 14,85 | 15,25      | 15,9       | —     | —           | [5]             |
| 40К44Х19Н10В15                         | —              | —     | 14,5                 | 14,65 | 14,85      | 15,25 | 15,7       | 16,25      | 16,9  | —           | [5]             |
| 40К44Х20Н20М4В4Б4                      | —              | —     | 17,7                 | 17,55 | 17,55      | 17,55 | 17,6       | 17,65      | 17,75 | —           | [5]             |
| 12К51Х20Н10В15                         | —              | —     | 13,65                | —     | 14,65      | 15,3  | 15,85      | 16,3       | —     | —           | [5]             |
| 40К51Х24Н16М6                          | —              | —     | 13,9                 | 14,05 | 14,2       | 14,4  | 14,7       | 15,1       | 15,5  | —           | [5]             |
| 40К55Х25Н10В8                          | —              | —     | 14,05                | 14,4  | 14,9       | 15,5  | 16,35      | 16,7       | 16,75 | —           | [5]             |
| 40К65Х23Н2В6                           | —              | —     | 13,7                 | 14,15 | 14,55      | 15,05 | 15,65      | 16,3       | —     | —           | [5]             |
| 25К65Х25Н2М5                           | —              | —     | 14,05                | 14,25 | 14,55      | 14,85 | 15,4       | —          | —     | —           | [5]             |
| 125К65Х27В4С3                          | —              | —     | 14,5                 | 14,65 | 14,85      | 15,25 | 15,7       | 16,25      | —     | —           | [5]             |
| Кремнистые стали                       |                |       |                      |       |            |       |            |            |       |             |                 |
| 30ХС, 37ХС, 40ХС                       | 11,7           | 12,7  | 13,4                 | 14,0  | 14,4       | 14,5  | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| 15ХСМБ                                 | 10,11          | 11,72 | 12,17                | 12,64 | 13,98      | 13,65 | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| 15ХСМФ                                 | 11,84          | 12,12 | 12,43                | 12,60 | 12,93      | 13,13 | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| СХ6М                                   | 11,0           | —     | —                    | —     | 12,0       | 12,2  | 12,35      | —          | —     | —           | [5]             |
| 60С2А                                  | 12             | 12,8  | —                    | 13,5  | 13,4       | —     | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| 50С2Г                                  | 11,2           | 12,2  | 12,9                 | 13,4  | 13,7       | 14,1  | 14,4       | 13,6       | 13,7  | 14,5        | [5]             |
| Титановые и другие стали и сплавы      |                |       |                      |       |            |       |            |            |       |             |                 |
| 48ТС-1, 48ТС-2,<br>48ТС-3              | —              | —     | 11,9—12,6 (300—573К) |       |            | —     | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| 15Х25Т                                 | —              | 10,0  | 10,6                 | 10,8  | 11,3       | 11,5  | 11,6       | 11,6       | 12,2  | 12,2        | [37]            |
| ХВГ                                    | 11,0           | 12,0  | 13,0                 | 13,5  | 14,0       | 14,5  | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| Э (Армко)                              | —              | 11,7  | 12,99                | 13,71 | 14,15      | —     | —          | —          | —     | —           | [5]             |
| Э1                                     | 10,8           | 12,6  | 13,8                 | 14,6  | 14,8       | 14,3  | 14,3       | —          | —     | —           | [5]             |
| Э5                                     | 10,6           | 11,8  | 13,0                 | 14,0  | 14,7       | 15,3  | 15,6       | —          | —     | —           | [5]             |
| Э14                                    | —              | 11,7  | 12,7                 | 13,7  | 14,7       | 15,6  | 15,4       | —          | —     | —           | [5]             |
| Э16                                    | 7,0            | 10,7  | 13,1                 | 14,3  | 14,6       | 14,3  | 13,2       | —          | —     | —           | [5]             |

Т а б л и ц а 10.9. Температурный коэффициент линейного расширения цветных металлов и сплавов  
Приведены значения истинного ТКЛР  $\alpha$  (при данной температуре  $T$ ) или среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$  в интервале  $\Delta T$

| Вещество                     | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | Вещество    | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| <i>Бронза [3, 5, 29, 46]</i> |                               |                                                |             |                               |                                                |
| Бр. А5                       | 20                            | 18,2                                           | Бр. КН1-3   | 20                            | 16,1                                           |
| Бр. А7                       | 20—300                        | 17,8                                           | Бр. Мг0,3   | 25—300                        | 17,6                                           |
| Бр. АМц 9-2                  | 20                            | 17,0                                           | Бр. О10     | 20                            | 18,5                                           |
| Бр. АЖ 9-4                   | —200                          | 10,5                                           | Бр. ОС 8-12 | 20                            | 17,1                                           |
|                              | 20                            | 17,1                                           | Бр. ОС 5-25 | 20                            | 17,6                                           |
|                              | 20—300                        | 19,0                                           |             |                               |                                                |

| Вещество          | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ | Вещество       | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| Бр. АЖМц 10-3-1,5 | -200<br>20<br>20-400          | 11,9<br>17,0<br>20                             | Бр. ОФ 10-1    | -200<br>20<br>400             | 12,5<br>17<br>22                               |
| Бр. АЖН 11-6-6    | 20                            | 14,9                                           | Бр. ОФ 7-02    | 20<br>400                     | 17,5<br>19                                     |
| Бр. АЖН 10-4-4    | -200<br>20                    | 11,4<br>17,0                                   | Бр. ОФ 6,5-0,4 | 20<br>20-300                  | 17,1<br>19,1                                   |
| Бр. Б2            | -250<br>-100<br>25<br>200-300 | 11,5<br>15,6<br>17,0<br>19,0                   | Бр. ОФ 4-0,25  | 20-100<br>20-400              | 17,6<br>19,4                                   |
| Бр. Кд1           | 20                            | 17,6                                           | Бр. ОЦ 10-2    | 0-100                         | 18,3                                           |
| Бр. КМц 3-1       | -200<br>20<br>20-300          | 11,1<br>18,5<br>18                             | Бр. ОЦ 8-4     | 20<br>20-180                  | 16,6<br>18                                     |
| Бр. ОЦС 4-4-25    | 20<br>20-500                  | 18,2<br>19,0                                   | Бр. ОЦ 4-3     | 20                            | 18                                             |
| Бр. ОЦСН 3-7-5-1  | 20                            | 17,1                                           | Бр. ОЦС 6-6-3  | 20<br>300                     | 17,1<br>18,2                                   |
| Бр. Х0,8          | -170<br>20                    | 10,5<br>16,7                                   | Бр. С30        | 20-260                        | 18,4                                           |
| Бр. Х0,5          | -200<br>20                    | 11,7<br>17,6                                   | Сплав ХОТ      | 20-300                        | 17                                             |
|                   |                               |                                                | Бр. Цр 0,4     | 20-100<br>20-300<br>20-600    | 16,32<br>17,90<br>19,80                        |

## Латунь [3, 5, 29, 46]

|           |                                        |                              |                         |              |              |
|-----------|----------------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Л56       | 20-300                                 | 18,1                         | ЛАЖ 60-1-1              | 20           | 21,6         |
| Л59       | 20                                     | 21                           | ЛАН 59-3-2              | 20           | 19           |
| Л62       | -200<br>20-100<br>20-300               | 14,1<br>19,0<br>20,6         | ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5 | 20           | 18,3         |
| Л63       | -200<br>20<br>20-300                   | 14,1<br>20,4<br>20,6         | ЛАЖМц 66-6-3-2          | —            | 19,8         |
| Л66       | 25-300                                 | 20,1                         | ЛЖМц 59-1-1             | -200<br>20   | 13,0<br>22   |
| Л68       | -250-20<br>-100-20<br>20-100<br>20-300 | 13,5<br>17,2<br>18,5<br>19,9 | ЛК80                    | 20           | 19,2         |
| Л70       | 20-300                                 | 19,9                         | ЛК80-3Л                 | -190<br>20   | 13,8<br>19,1 |
| Л75       | 20-300                                 | 19,6                         | ЛН 65-5                 | 20-300       | 17           |
| Л80       | 20                                     | 18,8                         | ЛМц 58-2                | 20           | 18,2         |
| Л85       | 20-300<br>20-100<br>20-300             | 19,1<br>17,7<br>18,7         | ЛО 90-1                 | 20           | 21,2         |
| Л90       | 20-100<br>20-300                       | 14,4<br>18,2                 | ЛО 70-1                 | 20-100<br>20 | 18,4<br>19,7 |
| Л96       | 20                                     | 17                           | ЛО 62-1                 | 20-300       | 19,9         |
| ЛА 85-0,5 | 20-300                                 | 18                           | ЛС 74-3                 | 20           | 19,3         |
| ЛА 77-2   | 20-300                                 | 18,6<br>18,5                 | ЛС 64-2                 | 20           | 17,5         |
|           |                                        |                              | ЛС 63-3                 | 20-300       | 19,8         |
|           |                                        |                              | ЛС 60-1                 | 20           | 20,3         |
|           |                                        |                              | ЛС 59-1                 | 20-300       | 20,5         |
|           |                                        |                              |                         | 20-300       | 20,8         |
|           |                                        |                              |                         | -200         | 13,9         |
|           |                                        |                              |                         | -100         | 18,3         |
|           |                                        |                              |                         | 20           | 20,6         |

## Магниеые сплавы [47]

|         |                   |              |      |                   |              |
|---------|-------------------|--------------|------|-------------------|--------------|
| ВМ 65-1 | 20-100<br>100-200 | 20,9<br>22,6 | МА5  | 20-100<br>200-300 | 26,1<br>28,5 |
| ВМ17    | 20-100            | 22,67        | МА8  | 20-100            | 23,7         |
| ВМД3    | 20-100<br>200-300 | 25,9<br>30,6 | МА9  | 200-300<br>20-100 | 32,1<br>25,5 |
| МА1     | 20-100<br>200-300 | 23,1<br>32,1 | МА11 | 200-300<br>20-100 | 32,3<br>25,7 |
| МА2     | 20-100<br>200-300 | 26,0<br>29,5 | МЛ2  | 200-300<br>20-100 | 30,1<br>26,6 |
| МА3     | 20-100<br>200-300 | 26,0<br>31,2 |      | 200-300           | 27,7         |

| Вещество | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | Вещество | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
|----------|-------------------------------|------------------------------------------------|----------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| МЛ4      | 20—100                        | 26,4                                           | МЛ10     | 20—100                        | 27,4                                           |
|          | 200—300                       | 28,3                                           |          | 200—300                       | 28,3                                           |
| МЛ5      | 20—100                        | 26,8                                           | МЛ11     | 20—100                        | 21,9                                           |
|          | 200—300                       | 28,7                                           |          | 200—300                       | 24,8                                           |
| МЛ6      | 20—100                        | 26,1                                           | МЛ12     | 20—100                        | 26,2                                           |
|          | 200—300                       | 27,7                                           |          | 200—300                       | 31,1                                           |
| МЛ9      | 20—100                        | 23,4                                           | МЛ15     | 20—100                        | 25,9                                           |
|          | 200—300                       | 32,7                                           |          | 200—300                       | 27,9                                           |

## Никелевые сплавы [3, 5, 29, 46]

|                          |         |       |              |         |      |
|--------------------------|---------|-------|--------------|---------|------|
| МН16 (ТБ)                | 20      | 15,3  |              | —173    | 6,52 |
| МН19                     | 20      | 16    |              | —73     | 10,0 |
| МН95-5                   | 20      | 16,4  |              | 20      | 10,4 |
| МНЖ 5-1                  | 20      | 13,7  | 38НК         | —100—20 | 4,30 |
| МНМц 43-0,5, копель      | 20      | 14,0  |              | —60—20  | 3,90 |
|                          | 20—600  | 16,8  | 34НК         | —100—20 | 8,00 |
|                          | 20—1000 | 18,8  | 33НК         | —100—20 | 8,60 |
| МНМц 40-1,5              | —       | 14,4  |              | —70—20  | 10,0 |
| МНМц 3-12                | 100     | 16    | 29НК         | —100—20 | 6,30 |
| МНЦ 15-20, нейзильбер    | 20—100  | 16,6  |              | —70—20  | 6,50 |
| НМц5                     | —       | 13,7  | 38НКД        | —100—20 | 7,20 |
| НМц2,5                   | —       | 13,4  | 32НКД, инвар | —60—20  | 0,90 |
| НМцАК 2-2-1, алюмель     | 20      | 13,7  | 30НКД        | —100—20 | 5,40 |
| НМЖМц 30-1-1, мельхнор   | 25—300  | 16    | 37НКДП       | 20—100  | 10,9 |
| НМЖМц 28-2,5-1,5, монель | 20—100  | 14,2  |              | 20—500  | 12,2 |
|                          | 25—300  | 14,9  | 40НКМП       | 20—100  | 11,0 |
|                          | 20—600  | 16,1  |              | 20—500  | 12,1 |
| НХ9,5, хромель           | 0—1000  | 12,8  | 35НКТ, инвар | —100—20 | 2,3  |
| НХ9, хромель А           | 20      | 12,8  |              | —60—20  | 2,2  |
|                          | 0—1000  | 12,8  | 35НКХСП      | 20—100  | 10,8 |
| Н65М28, хастеллой        | 20—300  | 11,1  |              | 20—500  | 11,8 |
|                          | 20—500  | 11,8  | 80НМ         | 20—100  | 12,2 |
|                          | 20—1000 | 15,2  |              | 20—500  | 14,5 |
| Н64М28                   | 20—100  | 10,0  | 79НМ         | 20—100  | 10,5 |
|                          | 20—1000 | 14,6  |              | 20—500  | 12,7 |
| 78Н                      | 20—100  | 12,0  | 77НМД        | 20—100  | 12,7 |
| 50Н                      | 20—100  | 8,9   |              | 20—500  | 14,9 |
|                          | 20—500  | 9,4   | 81НМТ        | 20—100  | 11,8 |
| 46Н                      | —100—20 | 7,7   |              | 20—500  | 13,5 |
| 45Н                      | 20—100  | 8,2   | 65НП         | 20—100  | 11,8 |
|                          | 20—400  | 7,7   |              | 20—500  | 13,2 |
|                          | 20—500  | 9,0   | 36НХ, инвар  | —269    | —0,5 |
| 42Н                      | —100—20 | 4,9   |              | —263    | —1,3 |
| 36Н, инвар               | —100—20 | 1,10  |              | —253    | —1,6 |
| 49НД, ковар              | —100    | 10,6  |              | —223    | —0,2 |
|                          | 20      | 4,50  |              | —173    | 1,9  |
| 47НД                     | —269    | 0,005 |              | —73     | 1,9  |
|                          | —263    | 0,02  |              | 20      | 1,9  |
|                          | —253    | 0,12  | 76НХД        | 20—100  | 11,8 |
|                          | —233    | 1,20  |              | 20—500  | 14,5 |

## Легкоплавкие сплавы и припои [3, 48, 49]

|              |    |      |          |    |      |
|--------------|----|------|----------|----|------|
| ПМЦ36        | —  | 22   | 99Pb1Sb  | 20 | 28,8 |
| ПМЦ48, ПМЦ54 | —  | 21   | 85Pb15Sb | 20 | 24,8 |
| 50Pb50Sn     | 20 | 25,5 |          |    |      |

| Вещество | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | Вещество | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
|----------|-------------------------------|------------------------------------------------|----------|-------------------------------|------------------------------------------------|
|----------|-------------------------------|------------------------------------------------|----------|-------------------------------|------------------------------------------------|

## Тугоплавкие сплавы [3, 5, 20, 57]

|       |        |       |                 |        |      |
|-------|--------|-------|-----------------|--------|------|
| AT2   | 20     | 8,72  | OT4-1           | 25     | 8,0  |
| BP20  | 200    | 4     | TB1             | 20     | 8,74 |
| BT3   | 20     | 8,55  | TB-10           | 20     | 6,34 |
| BT3-1 | 20     | 8,52  | 40Nb60V         | 20     | 8,27 |
| BT5   | 20—700 | 10,5  | 50Nb25V25Zr     | 20     | 7,85 |
| BT5-1 | 20     | 9,15  | WC + 5,9%Co     | 20—100 | 4,5  |
| BT6   | 20     | 9,10  |                 | 20—400 | 5,2  |
| BT8   | 20     | 8,6   | W + 0,015% Mo + | 20—100 | 4,3  |
|       | 20—300 | 9,8   | + 0,005% Cu +   | 20—500 | 4,6  |
|       | 20—800 | 10,25 | + 0,002% As     |        |      |
| BT14  | 20     | 8,48  | 60W40Cu         | 20—100 | 8,0  |
| BT15  | 20     | 8,30  | 98,8Zr1,2Hf     | 20—700 | 10,2 |
|       |        |       |                 | 20     | 6,28 |

## Сплавы урана и плутония [3, 5]

| Сплавы U—Al |    |      | Сплавы U—Zr  |        |      |
|-------------|----|------|--------------|--------|------|
| A11         | 20 | 13,8 | Zr5          | 20     | 14,5 |
| A12         | 20 | 14,1 | Zr70         | 20     | 8,40 |
| Сплавы U—Cr |    |      | Сплавы Pu—Al |        |      |
| Cr5         | 20 | 14,5 | 98% Al       | 40—600 | 28,1 |
| Cr50        | 20 | 10,4 | 90% Al       | 40—600 | 25,7 |
| Cr70        | 20 | 8,52 |              |        |      |

Таблица 10.10. Температурный коэффициент линейного расширения алюминиевых сплавов.  
Приведены значения истинного ТКЛР  $\alpha$  (при данной температуре  $T$ )  
или среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$  (в интервале  $\Delta T$ )

| Марка   | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | Марка | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
|---------|-------------------------------|------------------------------------------------|-------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| A132    | 20—100                        | 19,0                                           | АЛ1   | 20—100                        | 22,5                                           |
|         | 20—200                        | 20,0                                           |       | 20—200                        | 23,4                                           |
|         | 20—300                        | 21,0                                           |       | 20—300                        | 24,8                                           |
| AB      | 20—100                        | 23,4                                           |       | 20—100                        | 22,3                                           |
|         | 20—200                        | 24,5                                           |       | 20—200                        | 23,2                                           |
|         | 20—300                        | 25,4                                           |       | 20—300                        | 24,4                                           |
| AD, AD1 | —200                          | 6,10                                           | АЛ2   | —200                          | 7,20                                           |
|         | —100                          | 18,6                                           |       | —100                          | 15,7                                           |
|         | 20—100                        | 23,5                                           |       | 20—100                        | 21,1                                           |
|         | 20—200                        | 24,6                                           |       | 20—200                        | 22,1                                           |
| AD33    | 20—300                        | 25,6                                           | АЛ3   | 20—300                        | 23,3                                           |
|         | —200—20                       | 18,0                                           |       | 20—100                        | 22,0                                           |
|         | —100—20                       | 20,9                                           |       | 20—200                        | 23,2                                           |
|         | 20—100                        | 23,2                                           |       | 20—300                        | 24,0                                           |
| AK4     | 20—300                        | 25,0                                           | АЛ4   | 20—100                        | 21,7                                           |
|         | —173,2                        | 16,4                                           |       | 20—200                        | 22,5                                           |
|         | 20—100                        | 22                                             |       | 20—300                        | 23,5                                           |
|         | 20—200                        | 23,1                                           | АЛ5   | 20—100                        | 23,1                                           |
| AK6     | 20—300                        | 24                                             |       | 20—200                        | 23,9                                           |
|         | —200                          | 7,60                                           |       | 20—300                        | 25,2                                           |
|         | —100                          | 16,0                                           | АЛ6   | 20—100                        | 21,5                                           |
|         | 20—100                        | 21,4                                           |       | 20—200                        | 22,5                                           |
| AK7     | —200—20                       | 16,6                                           |       | 20—300                        | 23,5                                           |
|         | —100—20                       | 19,3                                           | АЛ7   | 20—100                        | 23,0                                           |
| AK8     | —200                          | 3,02                                           |       | 20—200                        | 24,0                                           |
|         | —100                          | 17,7                                           |       | 20—300                        | 25,0                                           |

Т  
л  
—

| Марка | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | Марка      | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
|-------|-------------------------------|------------------------------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| АЛ8   | —173,2                        | 18,3                                           | В92        | —200                          | 16,5                                           |
|       | 20—100                        | 24,5                                           |            | —100                          | 21,4                                           |
|       | 20—200                        | 25,6                                           |            | 20—100                        | 24,1                                           |
|       | 20—300                        | 23,3                                           |            | 20—100                        | 21,9                                           |
| АЛ9   | —200                          | 8,60                                           | В93        | —200                          | 4,23                                           |
|       | —100                          | 18,2                                           |            | —100                          | 18,4                                           |
|       | 20—100                        | 23,0                                           |            | 20—100                        | 23,2                                           |
|       | 20—200                        | 24,0                                           |            | 20—200                        | 24,3                                           |
| АЛ10В | 20—300                        | 24,5                                           |            | 20—300                        | 25,9                                           |
|       | 20—100                        | 22,3                                           | В65        | —193,2                        | 19,9                                           |
|       | 20—200                        | 23,3                                           |            | —100                          | 22,3                                           |
|       | 20—300                        | 25,4                                           |            | 20—100                        | 18,1                                           |
| АЛ11  | 20—100                        | 24,0                                           |            | 20—100                        | 22,9                                           |
|       | 20—200                        | 24,4                                           |            | 20—300                        | 27,8                                           |
|       | 20—300                        | 26,6                                           | Вн11-3     | 20—100                        | 25,5                                           |
|       | 20—100                        | 22,0                                           |            | 20—200                        | 25,6                                           |
| АЛ12  | 20—200                        | 23,0                                           |            | 20—300                        | 27,3                                           |
|       | 20—300                        | 23,5                                           |            | —200                          | 16,4                                           |
| АЛ13  | 20—100                        | 20,0                                           | ВАД-1      | —100                          | 19,3                                           |
|       | 20—200                        | 24,0                                           |            | —200                          | 12,0                                           |
|       | 20—300                        | 27,0                                           |            | —100                          | 18,3                                           |
|       | —173,2                        | 16,4                                           | ВД17       | —200—20                       | 21,8                                           |
| АЛ19  | 20—100                        | 19,5                                           |            | —100—20                       | 21,9                                           |
|       | 20—200                        | 21,9                                           |            | 20—100                        | 22,9                                           |
|       | 20—300                        | 25,6                                           |            | 20—200                        | 23,4                                           |
| АЛ21  | 20—100                        | 22,9                                           |            | 20—300                        | 24,8                                           |
|       | 20—200                        | 24,6                                           | Д16        | —200                          | 14,6                                           |
|       | 20—300                        | 27,8                                           |            | —100                          | 17,0                                           |
| АЛ22  | 20—100                        | 24,5                                           |            | 20—100                        | 22,7                                           |
|       | 20—200                        | 25,6                                           |            | 20—200                        | 23,4                                           |
|       | 20—300                        | 27,3                                           |            | 20—300                        | 24,8                                           |
| АЛ25  | 20—100                        | 19,0                                           | Д18, Д18П  | —200                          | 10,0                                           |
|       | 20—200                        | 20,0                                           |            | —100                          | 18,9                                           |
|       | 20—300                        | 21,0                                           |            | 20—100                        | 22,7                                           |
|       | 20—100                        | 23,8                                           |            | 20—200                        | 23,4                                           |
| АМг2  | 20—200                        | 24,5                                           |            | 20—300                        | 24,8                                           |
|       | 20—300                        | 25,4                                           | Д20        | —200                          | 7,10                                           |
|       | —193,2                        | 9,2                                            |            | —100                          | 18,5                                           |
|       | —100                          | 18,3                                           | АМ8        | 20—100                        | 22,8                                           |
| АМг3  | 20—100                        | 23,5                                           |            | 20—100                        | 23,0                                           |
|       | 20—200                        | 24,5                                           |            | 20—100                        | 25,7                                           |
|       | 20—300                        | 25,5                                           |            | 20—100                        | 23,9                                           |
| АМг4  | —200                          | 7,5                                            | АСМ        | 20—100                        | 24,0                                           |
|       | —100                          | 18,5                                           |            | 20—100                        | 25,0                                           |
|       | —200                          | 4,82                                           |            | —223                          | 6,05                                           |
|       | —100                          | 18,9                                           |            | —73                           | 11,8                                           |
| АМг5  | 20—100                        | 23,9                                           | АН-2,5     | 20                            | 12,9                                           |
|       | 20—200                        | 24,8                                           |            | —200                          | 7,52                                           |
|       | 20—300                        | 25,9                                           |            | —100                          | 18,2                                           |
|       | —193,2                        | 6,05                                           |            | 27                            | 22,7                                           |
| АМц   | —100                          | 16,8                                           | Сплав 1915 | —200                          | 5,7                                            |
|       | 20—100                        | 24                                             |            | —100                          | 17,7                                           |
|       | 20—200                        | 24,8                                           |            | 7                             | 22,1                                           |
|       | 20—300                        | 25,9                                           |            |                               |                                                |
| АМцС  | —200                          | 7,01                                           | Сплав 1201 | —200                          | 5,7                                            |
|       | —100                          | 17,7                                           |            | —100                          | 17,7                                           |
|       | 27                            | 22,6                                           |            |                               |                                                |
|       |                               |                                                |            |                               |                                                |

Таблица 10.11. Температурный коэффициент линейного расширения пластмасс. Приведены значения истинного ТКЛР  $\alpha$  (при данной температуре  $T$ ) или среднего ТКЛР  $\bar{\alpha}$  (в интервале  $\Delta T$ )

Продолжение табл. 10.11

| Название                              | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ | Литература |
|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|------------|
| Аман                                  | —                             | 1,0—2,0                                        | [53]       |
| Аминопласты                           | —                             | 2,5—5,3                                        | [53]       |
| Анид                                  | —                             | 10                                             | [29]       |
| Анилоформальдегидные полимеры         | —                             | 5—6                                            | [29]       |
| Бакелит                               | —200—20                       | 4,5                                            | [3]        |
|                                       | —70—20                        | 6,7                                            | [3]        |
|                                       | 0                             | 7,6                                            | [3]        |
| Волокнит                              | —                             | 3—3,5                                          | [29]       |
| Дифлон                                | —                             | 6                                              | [53]       |
| Капролон                              | —                             | 6,6—9,8                                        | [53]       |
| Капрон А, Б, В                        | —                             | 12—14                                          | [29]       |
| Капрон стеклонаполненный              | —                             | 10—12                                          | [29]       |
| Кремнийорганические полимеры          | —                             | 0,5—2,0                                        | [29]       |
| Лавсан                                | —                             | 2,6—2,7                                        | [29]       |
| Меламинформальдегидные полимеры       | —                             | 4,0                                            | [29]       |
| Металлополимер для литевых форм       | 27                            | 3,0                                            | [3]        |
| Мочевинформальдегидные полимеры       | —                             | 2,7                                            | [29]       |
| Нейлон                                | —263—20                       | 4,3                                            | [3]        |
|                                       | —233—20                       | 4,6                                            | [3]        |
|                                       | —173—20                       | 5,2                                            | [3]        |
|                                       | —73—20                        | 5,4                                            | [3]        |
|                                       | —7—20                         | 4,0                                            | [3]        |
| Пенопласт ПВ                          | 30                            | 3,9                                            | [56]       |
| ПС                                    | 20                            | 5,2—8,4                                        | [56]       |
| ПС-1                                  | 30                            | 5,05                                           | [56]       |
| ПС-4                                  | 30                            | 6,2                                            | [56]       |
| ПСБ                                   | 30                            | 5,5                                            | [56]       |
| ПСВ                                   | —                             | 5,5—6,8                                        | [56]       |
| Пенопласт полиуретановый ПУ           | 20                            | 5,0                                            | [56]       |
| ПУ-101                                | 40                            | 6,6                                            | [56]       |
| Пенопласт полихлорвиниловый ПХВ-1     | 30                            | 4,6                                            | [56]       |
| Пенопласт                             | —                             | 2,7—7,9                                        | [55]       |
| Пентон                                | —                             | 7,8—8,0                                        | [29]       |
| Полиамид-6                            | —                             | 8,2—9,7                                        | [55]       |
| -12                                   | —                             | 9,6—10                                         | [53]       |
| -66                                   | —                             | 9,9                                            | [55]       |
| -68                                   | —                             | 6,0                                            | [3]        |
| -68 с графитом                        | 20                            | 10—20                                          | [29]       |
| -68BC                                 | —                             | 10—12                                          | [29]       |
| -68T-40                               | —                             | 4,5—4,8                                        | [29]       |
| -68T-60                               | 20                            | 3—3,5                                          | [29]       |
| -548, -54                             | —                             | 13                                             | [29]       |
| -Н, -С                                | —                             | 12                                             | [29]       |
| -АК7                                  | —                             | 10—11                                          | [29]       |
| Полиарилат                            | —                             | 6                                              | [53]       |
| Полибутилентерефталат                 | —                             | 13                                             | [54]       |
| Поливинилбутил ПВБ                    | —                             | 9,2                                            | [29]       |
| Поливинилбутилфталат                  | —                             | 13                                             | [29]       |
| ПВБФ                                  | —                             | —                                              | —          |
| Поливинилбутилэфир                    | —180                          | 9,0                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 13,0                                           | [3]        |
|                                       | 0—20                          | 22,0                                           | [3]        |
| Поливинилвторбутилэфир                | —180                          | 6,6                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 10,7                                           | [3]        |
|                                       | 20                            | 21,4                                           | [3]        |
| Поливинилгексилэфир                   | —180                          | 6,5                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 19,5                                           | [3]        |
|                                       | —60                           | 29,5                                           | [3]        |
| Поливинилдесилэфир                    | —180                          | 8,2                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 15,8                                           | [3]        |
|                                       | —                             | 22,6                                           | [3]        |
| Поливинилиденфторид                   | —                             | 8—12                                           | [54]       |
| Поливинилизобутилэфир                 | —180                          | 7,0                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 11,4                                           | [3]        |
|                                       | 20                            | 21,0                                           | [3]        |
| Поливинилизопропилэфир                | —160                          | 8,8                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 9,0                                            | [3]        |
|                                       | 20                            | 22,1                                           | [3]        |
| Поливинилкарбазол                     | —                             | 4,0                                            | [29]       |
| Поливинилметилэфир                    | —180                          | 5,2                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 6,9                                            | [3]        |
|                                       | 20                            | 22,4                                           | [3]        |
| Поливиниловый спирт                   | —                             | 7—12                                           | [29]       |
| Поливинилоктилэфир                    | —180                          | 7,1                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 12,5                                           | [3]        |
| Поливинилтолуол                       | —                             | 7,5                                            | [29]       |
| Поливинилфталат                       | —                             | 5,4                                            | [29]       |
| Поливинилфторид                       | —                             | 5                                              | [54]       |
| Поливинилхлорид (винипласт)           | —                             | 6—9                                            | [53]       |
| листовой                              | —                             | 6,7                                            | [29]       |
| ВМЛ-25                                | —50÷—10                       | 2,8                                            | [53]       |
|                                       | 10—30                         | 3,9                                            | [53]       |
| Поливинилэтилэфир                     | —180                          | 8,1                                            | [3]        |
|                                       | —80                           | 9,5                                            | [3]        |
|                                       | 0                             | 24,0                                           | [3]        |
| Полидиметилстирол                     | —                             | 7,9                                            | [29]       |
| Полихлорстирол                        | —                             | 7,0                                            | [29]       |
| Поликарбонат                          | —                             | 6—7                                            | [55]       |
| Полиметилакрилат                      | —                             | 8                                              | [29]       |
| Полиметилметакрилат: оргстекло ПА-200 | —200                          | 2,7                                            | [3]        |
|                                       | —50                           | 5,7                                            | [3]        |
|                                       | 0                             | 7,7                                            | [3]        |
|                                       | 20                            | 8,8                                            | [3]        |
| оргстекло СОЛ                         | 20                            | 7,1                                            | [53]       |
|                                       | 80                            | 12,5                                           | [53]       |
| оргстекло СТ-1                        | 20                            | 7,7                                            | [53]       |
|                                       | 100                           | 11,1                                           | [53]       |
| оргстекло 2-55                        | 20                            | 7,3                                            | [53]       |
| Полиметилсилоксан                     | —200                          | 6,8                                            | [3]        |
| ПМС                                   | —100                          | 8,5                                            | [3]        |
|                                       | 20                            | 10,0                                           | [3]        |
| Полиметилпентен                       | —                             | 1,2                                            | [55]       |
| Полиметилфенилсилоксан ПМФС-1         | —200                          | 5,4                                            | [3]        |
|                                       | —100                          | 6,7                                            | [3]        |
|                                       | 20                            | 10,0                                           | [3]        |
| Полиметилфенилсилоксан ПМФС-2         | —200                          | 7,2                                            | [3]        |
|                                       | —100                          | 8,5                                            | [3]        |
|                                       | 20                            | 14,0                                           | [3]        |
| Полиоксиметилен                       | —                             | 8,1                                            | [29]       |
| Полипропилен                          | 0—100                         | 11                                             | [29]       |
| стеклонаполненный                     | —                             | 1,9                                            | [29]       |



| Название                                                  | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | Литература |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|------------|
| Полистирол блочный                                        | —                             | 6—8                                            | [29]       |
| МС                                                        | —                             | 7—8                                            | [29]       |
| МСН                                                       | —                             | 6—9                                            | [54]       |
| СА                                                        | —                             | 7,4                                            | [29]       |
| САМП                                                      | —                             | 7,5                                            | [29]       |
| СВ                                                        | —                             | 8,5                                            | [29]       |
| светотехнический                                          | —                             | 6—7                                            | [53]       |
| Полистирол СН                                             | —                             | 8,6—9,5                                        | [29]       |
| ударопрочный СНП-2                                        | —                             | 8,6                                            | [29]       |
| ударопрочный                                              | —                             | 7,0                                            | [29]       |
| ПС-СУ2                                                    | —                             | —                                              | —          |
| ударопрочный УП-1Э                                        | —                             | 7,0                                            | [29]       |
| Полистирольный пластик АСБ                                | —                             | 8—10                                           | [29]       |
| Полисульфон                                               | —                             | 5,6                                            | [55]       |
| Политетрафторэтилен:                                      |                               |                                                |            |
| Фторопласт-4( $\rho = 2,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) | —263—20                       | 7,1                                            | [3]        |
|                                                           | —233—20                       | 7,7                                            | [3]        |
|                                                           | —173                          | 3,6                                            | [3]        |
|                                                           | 0                             | 11,5                                           | [3]        |
| Фторопласт-4, ГОСТ 10007—80                               | 120—200                       | 15                                             | [48]       |
| Фторопласт-4М                                             | 210—280                       | 21                                             | [48]       |
| Фторопласт-40                                             | —                             | 9                                              | [29]       |
| Фторопласт-42                                             | —                             | 6,2—9                                          | [29]       |
| Фторопласт-40П                                            | —                             | 9,7—26                                         | [29]       |
| Политрихлорфторэтилен (Фторопласт-3)                      | 0                             | 11,3                                           | [3]        |
|                                                           | —263—20                       | 3,96                                           | [3]        |
|                                                           | —233—20                       | 4,26                                           | [3]        |
|                                                           | —173—20                       | 4,74                                           | [3]        |
|                                                           | —73—20                        | 5,29                                           | [3]        |
|                                                           | 20                            | 5,57                                           | [3]        |
|                                                           | 120                           | 10                                             | [3]        |
| Полиуретан ПУ-1                                           | —                             | 13,5                                           | [29]       |
| Полифенолоксид                                            | —                             | 1,6—3,4                                        | [29]       |
| Полифенилсилоксан ПФС                                     | —200                          | 4,5                                            | [3]        |
|                                                           | —100                          | 5,7                                            | [3]        |
|                                                           | 20                            | 7,0                                            | [3]        |
| Полиформальдегид                                          | —                             | 7,9—8,1                                        | [55]       |
| Полихлорстирол                                            | —                             | 7,4                                            | [29]       |
| Полиэтилен:                                               |                               |                                                |            |
| ВД                                                        | 0—100                         | 22—55                                          | [29]       |
| НД                                                        | 0—100                         | 11—50                                          | [29]       |
| Полиэтилен СД                                             | —                             | 10—55                                          | [29]       |
| Полиэтилен (усредненные для ПЭ различных плотностей)      | —263—20                       | 7,2                                            | [29]       |
|                                                           | —233—20                       | 8,0                                            | [29]       |
|                                                           | —173—20                       | 9,96                                           | [29]       |
|                                                           | —73—20                        | 18,3                                           | [29]       |
|                                                           | 20                            | 34,0                                           | [29]       |
|                                                           | —                             | 20                                             | [29]       |
| Полиэтилен кабельный                                      | —                             | —                                              | —          |
| Полиэтилен стеклонеполненный прессованный:                |                               |                                                |            |
| 10 % стекловолокна                                        | 20                            | 7,0                                            | [3]        |
| 20 % стекловолокна                                        | 20                            | 5,2                                            | [3]        |
| 40 % стекловолокна                                        | 20                            | 3,0                                            | [3]        |
| Полиэтилентерефталат                                      | —100                          | 5,0                                            | [3]        |
|                                                           | 0                             | 6,6                                            | [3]        |
| Премиксы                                                  | —                             | 3,2—4,0                                        | [53]       |
| Пресс-материал ниплон                                     | —                             | 5,0                                            | [53]       |
| Пресс-материал фенилон                                    | —                             | 3,1—3,5                                        | [53]       |
| Пресс-материал на фенопластах                             | —                             | 1—2,5                                          | [53]       |
| Стекловолокнит В, прессованный                            | 25—200                        | 1,24                                           | [48]       |

| Название                                                          | $T, \Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha, \bar{\alpha}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | Литература |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|------------|
| Стекловолокно                                                     | 20—80                         | 0,9—1,2                                        | [53]       |
|                                                                   | 80—160                        | 0,4—0,8                                        | [53]       |
| Стеклолента:                                                      |                               |                                                |            |
| вдоль нитей                                                       | 25—100                        | 5,0                                            | [48]       |
| поперек нитей                                                     | 25—100                        | 8,5                                            | [48]       |
| Стеклопластики                                                    | —                             | 0,5—1,2                                        | [53]       |
| Стеклотекстолит ВФТ-С                                             | 20—100                        | 0,8                                            | [48]       |
| КАСТ-В                                                            | 20—100                        | 0,9                                            | [48]       |
| Текстолит листовой А-50                                           | —233                          | 0,55                                           | [3]        |
|                                                                   | —173                          | 1,25                                           | [3]        |
|                                                                   | —73                           | 1,8                                            | [3]        |
|                                                                   | 0                             | 2,5                                            | [3]        |
| Фенолформальдегидные полимеры                                     | —                             | 2,5—6,0                                        | [29]       |
| Фенолформальдегидные полимеры ударопрочные                        | —                             | 3,0—3,5                                        | [53]       |
| Фенолформальдегидный клей ВФТ-С                                   | —210—20                       | 3,98                                           | [3]        |
|                                                                   | —173—20                       | 4,35                                           | [3]        |
|                                                                   | —73—20                        | 5,21                                           | [3]        |
|                                                                   | 20                            | 5,97                                           | [3]        |
| Шеллак                                                            | <46                           | 9                                              | [53]       |
|                                                                   | >46                           | 4,4                                            | [53]       |
| Эпоксидные полимеры                                               | —                             | 5,5—6,5                                        | [29]       |
| диановые циклоалифатические                                       | —                             | 4,6—5,0                                        | [29]       |
| Эпоксидные смолы                                                  | —                             | 3,5—4,0                                        | [53]       |
| Эпоксидный клей, К-9                                              | —200—20                       | 7,0                                            | [3]        |
|                                                                   | —70—20                        | 8,01                                           | [3]        |
|                                                                   | —10—20                        | 8,75                                           | [3]        |
| ЭПК-1                                                             | —200—20                       | 5,16                                           | [3]        |
|                                                                   | —170—20                       | 5,64                                           | [3]        |
|                                                                   | —70—20                        | 7,05                                           | [3]        |
|                                                                   | 20                            | 7,74                                           | [3]        |
| К-63А                                                             | —170                          | 3,52                                           | [3]        |
|                                                                   | —70                           | 4,92                                           | [3]        |
|                                                                   | 20                            | 6,0                                            | [3]        |
| Эпоксидный материал                                               | 20—150                        | 2,6                                            | [53]       |
| КЭП                                                               | 150—200                       | 5,6                                            | [53]       |
| Эпоксититанкремний органический полимер с силикатным наполнителем | —200—20                       | 1,4—4,5                                        | [3]        |
| Этрол:                                                            |                               |                                                |            |
| ацетилцеллюлозный                                                 | —                             | 10—12                                          | [29]       |
| 2ДТ-43                                                            | —                             | —                                              | —          |
| нигроцеллюлозный                                                  | —                             | 6,7                                            | [29]       |
| этилцеллюлозный                                                   | —                             | 10—14                                          | [29]       |

Таблица 10.12. Температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , строительных материалов при 20 °С [3, 4, 16]

| Вещество        | $\alpha$ |
|-----------------|----------|
| Аглопорит:      |          |
| А-1             | 5,8      |
| А-2             | 3,2      |
| Аглопоритобетон | 5,5      |
| Асфальт         | 200      |
| Бакелит         | 28       |
| Бетон:          |          |
| тяжелый         | 10—14    |

| Вещество                                   | $\alpha$ |
|--------------------------------------------|----------|
| на граните                                 | 9,5      |
| на базальте                                | 8,6      |
| на известняке                              | 6,8      |
| на керамзите                               | 8,8—9,5  |
| на шлаке                                   | 7,8—9,5  |
| на перлите                                 | 9,5      |
| на вермикулите                             | 14,1     |
| на диатомите                               | 11,3     |
| Битум БНД 90/130 ( $-30^{\circ}\text{C}$ ) | 310      |
| Бумага твердая                             | 10       |
| Газозолобетон                              | 6,2—7,4  |
| Глина                                      | 8,1      |
| Гранит:                                    |          |
| серый среднезернистый                      | 8,3      |
| красный мелкозернистый                     | 7,1      |
| красный крупнозернистый                    | 5,2      |
| Диабаз:                                    |          |
| мелкозернистый                             | 7,05     |
| крупнозернистый                            | 6,6      |
| Доломит:                                   |          |
| С-1                                        | 9,3      |
| С-2                                        | 4,8      |
| С-21                                       | 3,4      |
| Б-10                                       | 9,3      |
| Б-12                                       | 9,1      |
| Дерево:                                    |          |
| бук                                        | 2,57     |
| дуб                                        | 4,92     |
| сосна                                      | 5,41     |
| ясень                                      | 9,5      |
| Древеснослоистый пластик (ДСП)             | 3—30     |
| Золобетон                                  | 9,1      |
| Известняк:                                 |          |
| С-3                                        | 6,0      |
| С-4                                        | 5,4      |
| К-1                                        | 7,4      |
| Я-7                                        | 6,5      |
| Керамическая плитка облицованная           | 5,9      |
| Керамзит:                                  |          |
| К-1                                        | 6,1      |
| К-2                                        | 4,2      |
| Керамзитобетон                             | 5,5—6,9  |
| Кирпичная кладка                           | 4,0      |
| Коксы:                                     |          |
| прокаленный КНПС                           | 2,5—3    |
| непрокаленный КНПС                         | 15—19    |
| полукокс КНПЛ-3                            | 19       |
| Мрамор                                     | 15       |
| Пек:                                       |          |
| каменноугольный                            | 36—45    |
| нефтяной                                   | 45       |
| Пемза:                                     |          |
| природная                                  | 5,6      |
| шлаковая                                   | 8,1—9,7  |
| Пеностекло                                 | 10,8     |
| Песчаник:                                  |          |
| П-1                                        | 10,4     |
| П-2                                        | 10,2     |
| Перлит вспученный                          | 5,6      |
| Перлитобетон                               | 6,8      |
| Раствор:                                   |          |
| цементно-песчаный № 1, 2, 3                | 10,4     |
| керамзитовый, состав по объему 1:2,5       | 8,1      |
| перлитовый, состав по объему 1:2,5         | 9,0      |

| Вещество                                              | $\alpha$ |
|-------------------------------------------------------|----------|
| Раствор из портландцемента на песке, состав по массе: |          |
| 1:1                                                   | 11—13,3  |
| 1:2                                                   | 10,1     |
| 1:3                                                   | 11,2     |
| 1:6                                                   | 9,2—10,4 |
| на кварцевом песке                                    | 9,5—11,2 |
| на доломите                                           | 11,4     |
| на известняке, состав по массе 1:2                    | 9,5      |
| Термозитобетон                                        | 9,15     |
| Туфолава                                              | 7,6      |
| Фибра                                                 | 9,0      |
| Шифер                                                 | 20       |
| Цементный камень глиноземистый                        | 6,7      |
| Эбонит вспученный                                     | ~60      |

### 10.3. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ (табл. 10.13)

Таблица 10.13. Температурный коэффициент объемного расширения газов и жидкостей при нормальном давлении [16]. Приведены значения истинного коэффициента объемного расширения  $\beta$  (при данной температуре  $T$ ) или среднего коэффициента объемного расширения  $\bar{\beta}$  (в интервале  $\Delta T$ ) (ж — жидкость, г — газ)

| Вещество                                    | Состояние | $T, \Delta T, \text{K}$ | $\beta, \bar{\beta}, 10^{-3} \text{K}^{-1}$ |
|---------------------------------------------|-----------|-------------------------|---------------------------------------------|
| <i>Элементы и неорганические соединения</i> |           |                         |                                             |
| Азот                                        | ж         | 68—89                   | 5,88                                        |
|                                             | г         | 373                     | 3,670                                       |
| Алюминий                                    | ж         | 935—1373                | 0,113                                       |
|                                             | ж         | 223                     | 1,93                                        |
| Аммиак                                      | г         | 373                     | 3,808                                       |
|                                             | ж         | 84—90                   | 4,5                                         |
| Аргон                                       | г         | 373                     | 3,676                                       |
|                                             | ж         | 293                     | 1,132                                       |
| Бром                                        | ж         | 273                     | 0,122                                       |
|                                             | ж         | 544—903                 | —0,064                                      |
| Висмут                                      | ж         | 273                     | 0,070                                       |
|                                             | ж         | 283                     | 0,182                                       |
| Вода (на линии насыщения)                   | ж         | 293                     | 0,449                                       |
|                                             | ж         | 323                     | 0,752                                       |
| Водород                                     | ж         | 373                     | 12,6                                        |
|                                             | г         | 14—20.39                | 3,659                                       |
| Водород хлористый                           | г         | 373                     | 3,769                                       |
|                                             | ж         | 273                     | 1,95                                        |
| Водород цианистый                           | ж         | 259                     | 0,121                                       |
|                                             | ж         | 373                     | 0,1143                                      |
| Галлий                                      | ж         | 473                     | 0,1066                                      |
|                                             | ж         | 673                     | 0,0973                                      |
| Гелий                                       | ж         | 1173                    | 137                                         |
|                                             | ж         | 4,2                     | 3,658                                       |
| Гелий-3                                     | г         | 373                     | 580                                         |
|                                             | ж         | 3,2                     | 3,96                                        |
| Дициан                                      | г         | 273                     | 0,80                                        |
|                                             | ж         | 380—423                 | 0,137                                       |
| Иод                                         | ж         | 595—817                 | 0,280                                       |
|                                             | ж         | 373                     |                                             |
| Кадмий                                      | ж         |                         |                                             |
|                                             | ж         |                         |                                             |
| Калий                                       | ж         |                         |                                             |
|                                             | ж         |                         |                                             |

| Вещество                 | Состояние | T, ΔT, К  | $\beta, \bar{\beta}, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ |
|--------------------------|-----------|-----------|----------------------------------------------|
| Кислород                 | ж         | 68—89     | 3,85                                         |
| Кремний четыреххлористый | ж         | 293       | 1,430                                        |
| Криптон                  | г         | 373       | 3,311                                        |
| Литий                    | ж         | 458—508   | 0,174                                        |
| Магний                   | ж         | 923—1073  | 0,380                                        |
| Натрий                   | ж         | 373—453   | 0,275                                        |
|                          | ж         | 373—973   | 0,390                                        |
| Неон                     | г         | 373       | 3,659                                        |
| Озон                     | ж         | 90        | 2,0                                          |
| Олово                    | ж         | 505—673   | 0,106                                        |
|                          | ж         | 505—1873  | 0,100                                        |
| Ртуть [59]               | ж         | 323,15    | 0,18190                                      |
|                          | ж         | 373,15    | 0,18245                                      |
|                          | ж         | 573,15    | 0,18677                                      |
|                          | ж         | 1073      | 0,188                                        |
| Рубидий                  | ж         | 313—413   | 0,339                                        |
| Свинец                   | ж         | 601—1098  | 0,120                                        |
| Сера                     | ж         | 388       | 0,430                                        |
|                          | ж         | 425       | 0,490                                        |
|                          | ж         | 438       | 0,170                                        |
|                          | ж         | 483       | 0,344                                        |
|                          | ж         | 630       | 0,388                                        |
| Серебро                  | ж         | 1236—1373 | 0,111                                        |
| Серная кислота           | ж         | 293       | 0,576                                        |
| Сероуглерод              | ж         | 293       | 1,218                                        |
| Серы двуоксид            | ж         | 223       | 1,70                                         |
| Таллий                   | ж         | 573—626   | 0,150                                        |
| Углерода двуоксид        | г         | 223—273   | 4,95                                         |
|                          | г         | 273—373   | 3,723                                        |
| Углерода оксид           | ж         | 68—81     | 4,91                                         |
|                          | г         | 273—373   | 3,669                                        |
| Фосфор                   | ж         | 323—333   | 0,52                                         |
| Фосфор трехбромистый     | ж         | 293       | 0,868                                        |
| Фосфор треххлористый     | ж         | 293       | 1,154                                        |
| Фосфора хлороокись       | ж         | 293       | 1,116                                        |
| Фтор                     | ж         | 55—85     | 3,0                                          |
| Хлор                     | ж         | 172—239,4 | 1,41                                         |
| Цезий                    | ж         | 303—325   | 0,341                                        |
| Цинк                     | ж         | 693—816   | 0,147                                        |

## Органические соединения

|                       |   |         |       |
|-----------------------|---|---------|-------|
| Азотноэтиловый эфир   | ж | 293     | 1,299 |
| Аллил бромистый       | ж | 293     | 1,241 |
| Аллил иодистый        | ж | 293     | 1,091 |
| Аллил хлористый       | ж | 293     | 1,475 |
| Аллиловый спирт       | ж | 293     | 1,049 |
| Амил бромистый        | ж | 293     | 1,102 |
| Амил иодистый         | ж | 293     | 0,986 |
| Амил хлористый        | ж | 293     | 1,208 |
| Амилацетат            | ж | 293     | 1,162 |
| Амиловый спирт        | ж | 293     | 0,902 |
| Анилин                | ж | 293     | 0,858 |
| Ацетилен              | г | 273—373 | 3,739 |
| Ацетонитрил           | ж | 293     | 1,301 |
| Бензоил хлористый     | ж | 293     | 0,880 |
| Бензойноамиловый эфир | ж | 293     | 0,848 |
| Бензойноэтиловый эфир | ж | 293     | 0,900 |
| Бензол                | ж | 293     | 1,237 |
| Бутан                 | ж | 253—303 | 2,0   |
| Бутиловый спирт       | ж | 293     | 0,950 |

| Вещество                   | Состояние | T, ΔT, К | $\beta, \bar{\beta}, 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ |
|----------------------------|-----------|----------|----------------------------------------------|
| Глицерин                   | ж         | 293      | 0,505                                        |
| Диаллил                    | ж         | 293      | 1,357                                        |
| Диаллиловый эфир           | ж         | 293      | 1,346                                        |
| Диизопропиловый эфир       | ж         | 293      | 1,452                                        |
| Диметилсульфид             | ж         | 293      | 1,082                                        |
| Дипропиловый эфир          | ж         | 293      | 1,354                                        |
| Диэтилкетон                | ж         | 293      | 1,233                                        |
| Диэтилоксалат              | ж         | 293      | 1,136                                        |
| Диэтилсульфид              | ж         | 293      | 1,278                                        |
| Изогексан                  | ж         | 293      | 1,445                                        |
| Изомасляная кислота        | ж         | 293      | 1,068                                        |
| Изопентан                  | ж         | 293      | 1,680                                        |
| Изопрен                    | ж         | 293      | 1,570                                        |
| Изопропиловый спирт        | ж         | 293      | 1,094                                        |
| Капроновая кислота         | ж         | 293      | 0,975                                        |
| пара-Ксилол                | ж         | 293      | 1,02                                         |
| орто-Ксилол                | ж         | 293      | 0,97                                         |
| мета-Ксилол                | ж         | 293      | 0,99                                         |
| Масляная кислота           | ж         | 293      | 1,063                                        |
| Метилацетат                | ж         | 293      | 1,427                                        |
| Метил бромистый            | ж         | 293      | 1,684                                        |
| Метил иодистый             | ж         | 293      | 1,273                                        |
| Метилловый спирт           | ж         | 293      | 1,199                                        |
| Метилформиат               | ж         | 293      | 1,563                                        |
| Метилэтилкетон             | ж         | 293      | 1,315                                        |
| Муравьиная кислота         | ж         | 293      | 1,025                                        |
| Неопентан                  | ж         | 293      | 1,6                                          |
| Олеиновая кислота          | ж         | 293      | 0,721                                        |
| Пентан                     | ж         | 293      | 1,605                                        |
| Пропан                     | ж         | 205—243  | 1,9                                          |
| Пропан бромистый           | ж         | 293      | 1,447                                        |
| Пропан иодистый            | ж         | 293      | 1,102                                        |
| Пропан хлористый           | ж         | 293      | 1,591                                        |
| Пропиловый спирт           | ж         | 293      | 0,956                                        |
| Пропионовая кислота        | ж         | 293      | 1,102                                        |
| Толуол                     | ж         | 323      | 1,138                                        |
| Уксусная кислота           | ж         | 293      | 1,071                                        |
| Фенол                      | ж         | 293      | 1,090                                        |
| Хлораль                    | ж         | 293      | 0,934                                        |
| Хлороформ                  | ж         | 293      | 1,273                                        |
| Этан                       | ж         | 143—200  | 2,4                                          |
| Этилбензол                 | ж         | 293      | 0,961                                        |
| Этил бромистый             | ж         | 293      | 1,418                                        |
| Этил иодистый              | ж         | 293      | 1,179                                        |
| Этил хлористый             | ж         | 293      | 1,709                                        |
| Этиленгликоль              | ж         | 293      | 0,6375                                       |
| Этиловый спирт             | ж         | 293      | 1,120                                        |
| Этиловый (диэтиловый) эфир | ж         | 293      | 1,656                                        |
| Этилформиат                | ж         | 293      | 1,417                                        |

## Смеси

|                        |   |         |       |
|------------------------|---|---------|-------|
| Бензин Б-70            | ж | 313     | 1,496 |
|                        | ж | 423     | 1,752 |
| Воздух                 | г | 273—373 | 3,670 |
| Керосин Т-1            | ж | 293     | 0,955 |
| Масло машинное МС-20   | ж | 303     | 0,638 |
| Масло машинное МК-22   | ж | 323     | 0,886 |
| Масло трансформаторное | ж | 273     | 0,680 |
|                        | ж | 393     | 0,740 |
| Петролейный эфир       | ж | 293     | 2,26  |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974.
2. Свойства элементов: Справочник. — 2-е изд./Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1976.
3. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — 2-е изд. М.: Машиностроение. 1982.
4. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение. 1975.
5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник/Под ред. Б. Е. Неймарка. М.—Л.: Энергия, 1967.
6. Petrenko N. S., Popov V. P., Puskarev E. A., Finkel V. A.//Phys. Stat. Solidi (b). 1975. Vol. 68. № 2. P. K145—K160.
7. Гешко Е. И., Михальченко В. П., Шарлай Б. М.//Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 1803—1804.
8. Shouten D. R., Swenson C. A.//Phys. Rev. B, Solid Stat. 1974. Vol. 10. № 6. P. 2175—2185.
9. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: Справочное пособие/Под ред. Р. А. Нилсенера. М.: Энергия. 1973.
10. Петренко Н. С., Попов В. П.//Физ. низких температур. 1979. Т. 5. № 3. С. 301—304.
11. Сирота Н. Н., Жабко Т. Е.//Докл. АН СССР. 1977. Т. 236. № 5. С. 1120—1122.
12. Grosse R. e. a.//J. Phys. 1978. Vol. C11. № 1. P. 45—53.
13. Handbook of Optics/Ed. W. G. Driscoll. N. Y.—Toronto, 1978.
14. White G. K./High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11. № 4. P. 471—475.
15. Финкель В. А., Смирнов Ю. И., Воробьев В. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. № 1. С. 32.
16. Таблицы физических величин: Справочник. — 1-е изд./Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976.
17. Оптические материалы для инфракрасной техники/Е. М. Воронкова, Б. И. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. М.: Наука. 1965.
18. Bland J. A.//Canad. J. Phys. 1959. Vol. 37. № 4. P. 417—421.
19. Barnes J. O., Ragene J. A.//Phys. Lett. 1974. Vol. 46A. № 5. P. 317—318.
20. Рябцев Н. Г. Материалы квантовой электроники. М.: Сов. радио. 1972.
21. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах/Под ред. К. Хогарта: Пер. с англ. М.: Мир. 1968.
22. Материалы для оптоэлектроники: Сборник статей: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.
23. Rapp J. E., Merchaut H. D.//J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. № 9. P. 3919—3923.
24. Титанат бария: Сборник статей/Под ред. Н. В. Белова. М.: Наука. 1973.
25. Сирота Н. Н.//Химическая связь в полупроводниках и термодинамика. Минск: Наука и техника. 1966.
26. Бойко А. А., Головин В. А.//Кристаллография. 1970. Т. 15. № 1. С. 186—189.
27. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды). М.: Энергия. 1977.
28. Mazony Y., Perkins H. K.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. № 13. P. 5130—5131.
29. Справочник по электротехническим материалам. — 2-е изд./Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Л.: Энергия. 1976.
30. Шелкотунов В. А., Даннлов В. И., Калачева В. С.//Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1976. Т. 12. № 6. С. 1076—1080.
31. Физико-химические свойства окислов: Справочник. — 2-е изд./Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1978.
32. Высокотемпературные неорганические соединения. Киев: Наукова думка. 1965.
33. Масленников С. Б. Жаропрочные стали и сплавы: Справочник. М.: Металлургия. 1983.
34. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справочник. — 2-е изд. М.: Металлургия. 1976.
35. Mizutani T. e. a.//Jap. J. Appl. Phys. 1976. Vol. 15. № 7. P. 1305—1308.
36. Кузьминов Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука. 1982.
37. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы). Л.: Энергия. 1973.
38. Журавлев Н. Н. и др.//Кристаллография. 1961. Т. 6. № 5. С. 791—796.
39. Антонова М. М. Свойства гидридов металлов: Справочник. Киев: Наукова думка. 1975.
40. Cook W. R., Berlincourt D. A., Scholz F. J.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. № 5. P. 1392.
41. Материалы для ядерных реакторов: Пер. с англ./Под ред. Ю. Н. Сокурского. М.: Госатомиздат. 1963.
42. Стекло: Справочник/Под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1973.
43. Справочник оптика-технолога/Под ред. С. И. Кузнецова, М. А. Окатова. Л.: Машиностроение, 1983.
44. Справочник конструктора оптико-механических приборов/Под ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение. 1980.
45. Свойства и разработка новых оптических стекол/Под ред. Е. И. Царевского. Л.: Машиностроение. 1977.
46. Солнцев Ю. Н., Степанов Г. А. Материалы в криогенной технике. Справочник. Л.: Машиностроение, 1982.
47. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. — 3-е изд. М.: Металлургия. 1974.
48. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. — 6-е изд. М.: Машиностроение, 1982. Т. 1—3.
49. Артефьев Ю. М.//Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1980. Вып. 15. С. 115—123.
50. Приданцев М. В., Давыдова Л. Н., Тамарна И. А. Конструкционные стали: Справочник. М.: Металлургия. 1980.
51. Ульянов Е. А., Сорокина Н. А. Стали и сплавы в криогенной технике: Справочник. М.: Металлургия. 1984.
52. Техническая энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. М.: ОГИЗ, 1930. Т. 1.

53. Кацнельсон Н. Ю., Балаев Г. А. Пластические массы. Свойства и применения: Справочник. — 3-е изд. Л.: Химия. 1978.

54. Калинин Э. Л., Саковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. Л.: Химия. 1983.

55. Термопласты конструкционного назначения/Под ред. Е. Б. Тростянского. Л.: Химия. 1975.

56. Романенков И. Г. Физико-механические свойства пенных пластмасс. М.: Изд-во стандартов. 1970.

57. Теплофизические свойства веществ при низких температурах. Материалы I Всесоюзного совещания, февр. 1971. М.: Изд. ВНИИФТРИ, 1972.

58. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 56—83. М.: Изд-во стандартов, 1984.

59. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 3—77. М.: Изд-во стандартов, 1978.

60. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 59—83. М.: Изд-во стандартов, 1984.

61. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 45—83. М.: Изд-во стандартов, 1984.

62. Petukhov V. A., Chekhovskoi V. Ya., Andrianova V. G. // High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11. № 6. P. 625—627.

## ГЛАВА 11 ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ

В. В. Игнатьев, В. А. Криворучко, А. И. Мигачев

### 11.1 ПАРЫ ВОДЫ

Таблица 11.1. Давление паров воды [1]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$      | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$      | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$       | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$      |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 0                   | $6,108 \cdot 10^2$  | 46                  | $1,0095 \cdot 10^4$ | 94                  | $8,1460 \cdot 10^4$  | 142                 | $3,8228 \cdot 10^5$ |
| 0,01                | $6,112 \cdot 10^2$  | 48                  | $1,1161 \cdot 10^4$ | 96                  | $8,7685 \cdot 10^4$  | 144                 | $4,0418 \cdot 10^5$ |
| 2                   | $7,054 \cdot 10^2$  | 50                  | $1,2335 \cdot 10^4$ | 98                  | $9,4301 \cdot 10^4$  | 146                 | $4,2707 \cdot 10^5$ |
| 4                   | $8,129 \cdot 10^2$  | 52                  | $1,3612 \cdot 10^4$ | 100                 | $1,01325 \cdot 10^5$ | 148                 | $4,5099 \cdot 10^5$ |
| 6                   | $9,346 \cdot 10^2$  | 54                  | $1,5001 \cdot 10^4$ | 102                 | $1,0878 \cdot 10^5$  | 150                 | $4,7597 \cdot 10^5$ |
| 8                   | $1,0721 \cdot 10^3$ | 56                  | $1,6510 \cdot 10^4$ | 104                 | $1,1668 \cdot 10^5$  | 152                 | $5,0205 \cdot 10^5$ |
| 10                  | $1,2271 \cdot 10^3$ | 58                  | $1,8146 \cdot 10^4$ | 106                 | $1,2504 \cdot 10^5$  | 154                 | $5,2926 \cdot 10^5$ |
| 12                  | $1,4015 \cdot 10^3$ | 60                  | $1,9919 \cdot 10^4$ | 108                 | $1,3390 \cdot 10^5$  | 156                 | $5,5764 \cdot 10^5$ |
| 14                  | $1,5974 \cdot 10^3$ | 62                  | $2,1837 \cdot 10^4$ | 110                 | $1,4326 \cdot 10^5$  | 158                 | $5,8722 \cdot 10^5$ |
| 16                  | $1,8170 \cdot 10^3$ | 64                  | $2,3910 \cdot 10^4$ | 112                 | $1,5316 \cdot 10^5$  | 160                 | $6,1804 \cdot 10^5$ |
| 18                  | $2,0626 \cdot 10^3$ | 66                  | $2,6148 \cdot 10^4$ | 114                 | $1,6361 \cdot 10^5$  | 162                 | $6,5014 \cdot 10^5$ |
| 20                  | $2,3368 \cdot 10^3$ | 68                  | $2,8561 \cdot 10^4$ | 116                 | $1,7464 \cdot 10^5$  | 164                 | $6,8355 \cdot 10^5$ |
| 22                  | $2,6424 \cdot 10^3$ | 70                  | $3,1161 \cdot 10^4$ | 118                 | $1,8628 \cdot 10^5$  | 166                 | $7,1830 \cdot 10^5$ |
| 24                  | $2,9824 \cdot 10^3$ | 72                  | $3,3957 \cdot 10^4$ | 120                 | $1,9854 \cdot 10^5$  | 168                 | $7,5445 \cdot 10^5$ |
| 26                  | $3,3600 \cdot 10^3$ | 74                  | $3,6963 \cdot 10^4$ | 122                 | $2,1145 \cdot 10^5$  | 170                 | $7,9202 \cdot 10^5$ |
| 28                  | $3,7785 \cdot 10^3$ | 76                  | $4,0190 \cdot 10^4$ | 124                 | $2,2503 \cdot 10^5$  | 172                 | $8,3106 \cdot 10^5$ |
| 30                  | $4,2417 \cdot 10^3$ | 78                  | $4,3650 \cdot 10^4$ | 126                 | $2,3932 \cdot 10^5$  | 174                 | $8,7161 \cdot 10^5$ |
| 32                  | $4,7536 \cdot 10^3$ | 80                  | $4,7359 \cdot 10^4$ | 128                 | $2,5434 \cdot 10^5$  | 176                 | $9,1370 \cdot 10^5$ |
| 34                  | $5,3182 \cdot 10^3$ | 82                  | $5,1328 \cdot 10^4$ | 130                 | $2,7012 \cdot 10^5$  | 178                 | $9,5739 \cdot 10^5$ |
| 36                  | $5,9401 \cdot 10^3$ | 84                  | $5,5572 \cdot 10^4$ | 132                 | $2,8658 \cdot 10^5$  | 180                 | $1,0027 \cdot 10^6$ |
| 38                  | $6,6240 \cdot 10^3$ | 86                  | $6,0107 \cdot 10^4$ | 134                 | $3,0406 \cdot 10^5$  | 182                 | $1,0497 \cdot 10^6$ |
| 40                  | $7,3749 \cdot 10^3$ | 88                  | $6,4947 \cdot 10^4$ | 136                 | $3,2227 \cdot 10^5$  | 184                 | $1,0984 \cdot 10^6$ |
| 42                  | $8,1983 \cdot 10^3$ | 90                  | $7,0108 \cdot 10^4$ | 138                 | $3,4137 \cdot 10^5$  | 186                 | $1,1488 \cdot 10^6$ |
| 44                  | $9,0998 \cdot 10^3$ | 92                  | $7,5607 \cdot 10^4$ | 140                 | $3,6136 \cdot 10^5$  | 188                 | $1,2011 \cdot 10^6$ |

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$      | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$      | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$      | $t, ^\circ\text{C}$ | $p, \text{Па}$      |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 190                 | $1,2552 \cdot 10^6$ | 238                 | $3,2319 \cdot 10^6$ | 284                 | $6,8155 \cdot 10^6$ | 332                 | $1,3199 \cdot 10^7$ |
| 192                 | $1,3112 \cdot 10^6$ | 240                 | $3,3480 \cdot 10^6$ | 286                 | $7,0206 \cdot 10^6$ | 334                 | $1,3541 \cdot 10^7$ |
| 194                 | $1,3692 \cdot 10^6$ | 242                 | $3,4674 \cdot 10^6$ | 288                 | $7,2303 \cdot 10^6$ | 336                 | $1,3889 \cdot 10^7$ |
| 196                 | $1,4291 \cdot 10^6$ | 244                 | $3,5899 \cdot 10^6$ | 290                 | $7,4448 \cdot 10^6$ | 338                 | $1,4245 \cdot 10^7$ |
| 198                 | $1,4910 \cdot 10^6$ | 246                 | $3,7158 \cdot 10^6$ | 292                 | $7,6642 \cdot 10^6$ | 340                 | $1,4608 \cdot 10^7$ |
| 200                 | $1,5551 \cdot 10^6$ | 248                 | $3,8450 \cdot 10^6$ | 294                 | $7,8885 \cdot 10^6$ | 342                 | $1,4978 \cdot 10^7$ |
| 202                 | $1,6212 \cdot 10^6$ | 250                 | $3,9776 \cdot 10^6$ | 296                 | $8,1178 \cdot 10^6$ | 344                 | $1,5356 \cdot 10^7$ |
| 204                 | $1,6895 \cdot 10^6$ | 252                 | $4,1137 \cdot 10^6$ | 298                 | $8,3521 \cdot 10^6$ | 346                 | $1,5742 \cdot 10^7$ |
| 206                 | $1,7601 \cdot 10^6$ | 254                 | $4,2533 \cdot 10^6$ | 300                 | $8,5917 \cdot 10^6$ | 348                 | $1,6135 \cdot 10^7$ |
| 208                 | $1,8329 \cdot 10^6$ | 256                 | $4,3965 \cdot 10^6$ | 302                 | $8,8364 \cdot 10^6$ | 350                 | $1,6537 \cdot 10^7$ |
| 210                 | $1,9079 \cdot 10^6$ | 258                 | $4,5434 \cdot 10^6$ | 304                 | $9,0865 \cdot 10^6$ | 352                 | $1,6947 \cdot 10^7$ |
| 212                 | $1,9855 \cdot 10^6$ | 260                 | $4,6940 \cdot 10^6$ | 306                 | $9,3420 \cdot 10^6$ | 354                 | $1,7365 \cdot 10^7$ |
| 214                 | $2,0654 \cdot 10^6$ | 262                 | $4,8484 \cdot 10^6$ | 308                 | $9,6031 \cdot 10^6$ | 356                 | $1,7792 \cdot 10^7$ |
| 216                 | $2,1478 \cdot 10^6$ | 264                 | $5,0066 \cdot 10^6$ | 310                 | $9,8697 \cdot 10^6$ | 358                 | $1,8228 \cdot 10^7$ |
| 218                 | $2,2327 \cdot 10^6$ | 266                 | $5,1688 \cdot 10^6$ | 312                 | $1,0142 \cdot 10^7$ | 360                 | $1,8674 \cdot 10^7$ |
| 220                 | $2,3201 \cdot 10^6$ | 268                 | $5,3349 \cdot 10^6$ | 314                 | $1,0420 \cdot 10^7$ | 362                 | $1,9129 \cdot 10^7$ |
| 222                 | $2,4102 \cdot 10^6$ | 270                 | $5,5051 \cdot 10^6$ | 316                 | $1,0704 \cdot 10^7$ | 364                 | $1,9594 \cdot 10^7$ |
| 224                 | $2,5030 \cdot 10^6$ | 272                 | $5,6794 \cdot 10^6$ | 318                 | $1,0994 \cdot 10^7$ | 366                 | $2,0069 \cdot 10^7$ |
| 226                 | $2,5985 \cdot 10^6$ | 274                 | $5,8579 \cdot 10^6$ | 320                 | $1,1290 \cdot 10^7$ | 368                 | $2,0555 \cdot 10^7$ |
| 228                 | $2,6968 \cdot 10^6$ | 276                 | $6,0406 \cdot 10^6$ | 322                 | $1,1592 \cdot 10^7$ | 370                 | $2,1053 \cdot 10^7$ |
| 230                 | $2,7979 \cdot 10^6$ | 278                 | $6,2277 \cdot 10^6$ | 324                 | $1,1900 \cdot 10^7$ | 372                 | $2,1562 \cdot 10^7$ |
| 232                 | $2,9019 \cdot 10^6$ | 280                 | $6,4191 \cdot 10^6$ | 326                 | $1,2215 \cdot 10^7$ | 374                 | $2,2084 \cdot 10^7$ |
| 234                 | $3,0089 \cdot 10^6$ | 282                 | $6,6150 \cdot 10^6$ | 328                 | $1,2537 \cdot 10^7$ | 374,12              | $2,2115 \cdot 10^7$ |
| 236                 | $3,1189 \cdot 10^6$ |                     |                     | 330                 | $1,2865 \cdot 10^7$ |                     |                     |

## 11.2. ПАРЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Данные, приведенные в табл. 11.2—11.4, получены путем пересчета значений, выраженных в миллиметрах ртутного столба, в паскали. Пересчет производился на ЭВМ методом наименьших квадратов исходя из известного соотношения между давлением насыщенного пара и

температурой  $p = B - A/T$ .

Давление пара непутия получено расчетным путем из выражения

$$\lg p = 5,1 - 2,06 \cdot 10^4 (1/T),$$

приведенного в [2].

Таблица 11.2. Температура насыщения неорганических веществ, К;  $p = 10^{-8} \div 10^2$  Па [3]

| Вещество                   | Давление пара, Па |           |           |           |           |           |           |           |      |      |        |
|----------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|--------|
|                            | $10^{-8}$         | $10^{-7}$ | $10^{-6}$ | $10^{-5}$ | $10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $10^{-2}$ | $10^{-1}$ | 1    | 10   | $10^2$ |
| Азот                       | —                 | —         | 23,4      | 25,0      | 26,7      | 28,7      | 31,0      | 33,8      | 37,1 | 41,1 | 46,0   |
| Алюминий                   | 816,7             | 861,8     | 912,2     | 968,8     | 1033      | 1106      | 1190      | 1289      | 1405 | 1544 | 1713   |
| Алюминий трехфтористый     | —                 | —         | —         | —         | —         | —         | —         | 966,2     | 1024 | 1090 | 1165   |
| Алюминий фтористый         | —                 | —         | —         | —         | —         | —         | 812,2     | 898,0     | 1004 | 1138 | —      |
| Америций [4, 5]            | —                 | —         | —         | —         | —         | —         | 1066      | 1164      | 1283 | 1427 | 1609   |
| Америций трехфтористый [6] | —                 | —         | —         | 1083      | 1149      | 1225      | 1310      | 1409      | 1524 | —    | —      |

| Вещество                      | Давление пара, Па |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |        |        |                 |
|-------------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|-----------------|
|                               | 10 <sup>-9</sup>  | 10 <sup>-7</sup> | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-1</sup> | 1      | 10     | 10 <sup>2</sup> |
| Аммиак                        | —                 | —                | 89,9             | 95,2             | 101,1            | 107,8            | 115,4            | 124,2            | 134,4  | 146,5  | 160,9           |
| Аргон                         | —                 | —                | 26,5             | 28,3             | 30,3             | 32,7             | 35,5             | 38,7             | 42,6   | 47,4   | 53,5            |
| Барий                         | 492,6             | 521,6            | 554,1            | 591,0            | 633,1            | 681,7            | 738,4            | 805,3            | 885,6  | 983,7  | 1106            |
| Барий фтористый [6]           | —                 | —                | —                | —                | 1116             | 1187             | 1268             | 1361             | 1469   | —      | —               |
| Бария оксид [7]               | —                 | —                | 1153             | 1226             | 1309             | 1404             | 1514             | —                | —      | —      | —               |
| Бериллий                      | 864,4             | 911,4            | 963,8            | 1022             | 1089             | 1164             | 1251             | 1353             | 1471   | 1613   | 1785            |
| Бериллий фтористый [3, 8, 9]  | —                 | —                | —                | —                | 681,1            | 721,4            | 766,8            | 818,3            | 877,2  | 945,2  | 1024            |
| Бериллий хлористый [10]       | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 439,5            | 468,0            | 500,6  | 537,9  | 581,4           |
| Бор                           | 1456              | 1531             | 1614             | 1706             | 1810             | 1926             | 2059             | 2212             | 2389   | 2597   | 2845            |
| Бора оксид [3, 11]            | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 1234             | 1331             | 1445   | 1581   | 1744            |
| Бром                          | —                 | —                | 127,4            | 134,5            | 142,5            | 151,4            | 161,6            | 173,2            | 186,6  | 202,2  | 220,7           |
| Ванадий                       | 1282              | 1348             | 1421             | 1502             | 1594             | 1697             | 1814             | 1949             | 2105   | 2289   | 2508            |
| Висмут                        | 460,7             | 485,3            | 512,7            | 543,4            | 578,0            | 617,3            | 662,4            | 714,5            | 775,5  | 848,0  | 935,3           |
| Висмут треххлористый [12]     | —                 | —                | —                | —                | 327,1            | 345,4            | 365,8            | 388,8            | 414,8  | 444,6  | 479,1           |
| Вода                          | —                 | —                | 143,5            | 151,8            | 161,0            | 171,4            | 183,2            | 196,8            | 212,6  | 231,2  | 253,3           |
| Водород                       | —                 | —                | 3,7              | 4,0              | 4,3              | 4,8              | 5,3              | 5,9              | 6,8    | 7,9    | 9,4             |
| Водород бромистый             | —                 | —                | 67,1             | 71,4             | 76,4             | 82,1             | 88,7             | 96,4             | 105,6  | 116,8  | 130,7           |
| Водород фтористый             | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | —                | —      | 172,5  | 178,2           |
| Водород хлористый             | —                 | —                | 63,5             | 67,4             | 71,8             | 76,9             | 82,7             | 89,4             | 97,3   | 106,8  | 118,3           |
| Вольфрам                      | 2141              | 2249             | 2367             | 2500             | 2647             | 2814             | 3002             | 3218             | 3467   | 3759   | 4103            |
| Вольфрама трехокись [13]      | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 1252             | 1323             | 1401   | 1490   | 1590            |
| Гадолиний                     | —                 | —                | —                | —                | 1338             | 1437             | 1550             | 1683             | 1842   | 2033   | 2268            |
| Галлий                        | 744,2             | 786,2            | 833,3            | 886,4            | 946,6            | 1015             | 1095             | 1189             | 1300   | 1434   | 1599            |
| Галлий трехиодистый [14]      | —                 | —                | —                | —                | —                | 302,8            | 322,6            | 345,2            | 371,2  | 401,5  | 437,1           |
| Галлия оксид [15]             | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 1646             | 1752   | 1873   | 2012            |
| Гафний                        | 1675              | 1765             | 1865             | 1978             | 2104             | 2248             | 2414             | 2605             | 2829   | 3096   | 3418            |
| Гелий                         | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 0,6              | 0,8    | 0,9    | 1,2             |
| Германий                      | 972,4             | 1025             | 1085             | 1152             | 1228             | 1314             | 1414             | 1530             | 1666   | 1830   | 2028            |
| Германий селенистый [16]      | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 677,8            | 730,4  | 792,0  | 864,8           |
| Германий сернистый [3, 17]    | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 572,1            | 609,6            | 652,3  | 701,5  | 758,7           |
| Германий теллуристый [16, 18] | —                 | —                | —                | —                | —                | 620,7            | 661,1            | 707,1            | 760,0  | 821,4  | 893,6           |
| Гольмий                       | 810,0             | 870,0            | 915,0            | 985,0            | 1040,0           | 1160,0           | 1225,0           | 1350,0           | 1480,0 | 1556,0 | 1720,0          |
| Диспрозий [19]                | —                 | —                | —                | —                | 1009             | 1082             | 1165             | 1263             | 1378   | 1517   | 1686            |
| Европий                       | 500,0             | 528,1            | 559,7            | 595,5            | 635,6            | 681,9            | 735,4            | 798,1            | 872,4  | 961,9  | 1072            |
| Железо                        | 1010              | 1063             | 1123             | 1189             | 1263             | 1347             | 1443             | 1554             | 1684   | 1837   | 2021            |
| Железо бромистое [20, 21]     | —                 | —                | —                | —                | —                | 596,4            | 633,6            | 675,8            | 724,1  | 779,7  | 844,6           |
| Железо иодистое [21]          | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 614,3            | 653,3            | 697,6  | 748,3  | 807,0           |
| Железо хлористое [21]         | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 645,8            | 692,1            | 745,4  | 807,7  | 881,4           |
| Золото                        | 964,3             | 1017             | 1076             | 1143             | 1219             | 1305             | 1404             | 1520             | 1656   | 1819   | 2018            |
| Индий                         | 658,0             | 696,2            | 739,0            | 787,4            | 842,6            | 906,1            | 980,0            | 1067             | 1170   | 1297   | 1454            |
| Индий трехбромистый [14]      | —                 | —                | —                | —                | —                | 400,5            | 424,0            | 450,4            | 480,3  | 514,5  | 553,9           |
| Индий трехиодистый [14]       | —                 | —                | —                | —                | —                | 350,7            | 372,3            | 396,7            | 424,6  | 456,7  | 494,1           |
| Индий треххлористый [14]      | —                 | —                | —                | —                | —                | 455,2            | 482,3            | 512,8            | 547,5  | 587,1  | 633,0           |
| Индия оксид [22]              | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 1504             | 1590             | 1686   | 1795   | 1919            |
| Иод                           | 160,0             | 168,0            | 176,9            | 186,9            | 198,0            | 210,5            | 224,6            | 240,9            | 259,6  | 281,6  | 307,5           |
| Иридий                        | 1556              | 1636             | 1724             | 1822             | 1932             | 2057             | 2198             | 2360             | 2548   | 2768   | 3030            |
| Иттербий [19]                 | —                 | —                | —                | —                | 533,7            | 573,5            | 619,8            | 674,1            | 738,9  | 817,4  | 914,6           |
| Иттрий [14, 23]               | —                 | —                | —                | —                | 1375             | 1474             | 1590             | 1725             | 1885   | 2078   | 2314            |
| Иттрий треххлористый [24]     | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 751,3            | 821,4  | 906,0  | 1010            |
| Кадмий                        | 307,5             | 324,6            | 343,9            | 365,5            | 390,0            | 418,1            | 450,5            | 488,3            | 533,1  | 586,9  | 652,8           |
| Кадмий бромистый [25]         | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 486,0            | 528,6            | 579,5  | 641,1  | 717,5           |
| Кадмий мышьяковистый          | —                 | —                | —                | —                | —                | 510,3            | 543,7            | 581,7            | 625,5  | 676,3  | —               |
| Кадмий селенистый             | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 791,1            | 852,6            | 924,5  | 1009   | —               |
| Кадмий теллуристый            | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 712,5            | 770,2            | 838,0  | 919,0  | —               |
| Кадмий хлористый              | —                 | —                | —                | —                | 534,9            | 567,9            | 605,2            | 647,8            | 696,8  | 753,8  | 821,0           |
| Калий                         | 259,9             | 275,6            | 293,3            | 313,4            | 336,5            | 363,3            | 394,7            | 432,1            | 477,3  | 533,0  | 603,4           |
| Калий фтористый [26]          | —                 | —                | —                | —                | 738,7            | 785,9            | 839,6            | 901,2            | 972,5  | 1056   | 1155            |
| Калий хлористый               | —                 | —                | —                | —                | —                | 723,7            | 774,7            | 833,3            | 901,7  | 982,2  | 1078            |
| Кальций                       | 486,2             | 514,0            | 545,2            | 580,5            | 620,6            | 666,7            | 720,2            | 783,0            | 857,8  | 948,4  | 1060            |

| Вещество                   | Давление пара, Па |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |       |       |                 |
|----------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|-----------------|
|                            | 10 <sup>-8</sup>  | 10 <sup>-7</sup> | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-1</sup> | 1     | 10    | 10 <sup>2</sup> |
| Кальций фтористый [27, 28] | —                 | —                | —                | 1125             | 1193             | 1269             | 1356             | 1455             | 1571  | 1706  | 1866            |
| Кальций хлористый [29, 30] | —                 | —                | —                | 874,8            | 926,4            | 984,5            | 1050             | 1125             | 1212  | 1314  | 1434            |
| Кислород                   | —                 | —                | 27,8             | 29,6             | 31,6             | 33,8             | 36,4             | 39,5             | 43,1  | 47,4  | 52,7            |
| Кобальт                    | 877,4             | 922,4            | 972,3            | 1027             | 1090             | 1160             | 1240             | 1332             | 1439  | 1564  | 1713            |
| Кремний                    | 961,8             | 1011             | 1066             | 1128             | 1197             | 1275             | 1365             | 1467             | 1586  | 1727  | 1894            |
| Кремния оксид              | —                 | —                | —                | —                | —                | 1472             | 1615             | 1789             | —     | —     | —               |
| Криптон                    | —                 | —                | 36,5             | 38,9             | 41,7             | 45,0             | 48,8             | 53,3             | 58,7  | 65,3  | 73,6            |
| Ксенон                     | —                 | —                | 50,3             | 53,7             | 57,6             | 62,1             | 67,3             | 73,5             | 81,0  | 90,1  | 101,6           |
| Лантан                     | 1152              | 1216             | 1288             | 1368             | 1459             | 1564             | 1684             | 1825             | 1991  | 2190  | 2433            |
| Лантан треххлористый       | —                 | —                | —                | 803,0            | 847,4            | 897,1            | 953,0            | 1016             | 1088  | 1172  | —               |
| Литий                      | 447,7             | 473,8            | 503,2            | 536,4            | 574,4            | 618,1            | 669,0            | 729,1            | 801,0 | 888,7 | 997,9           |
| Литий фтористый [26, 31]   | —                 | —                | —                | —                | 829,6            | 880,1            | 937,2            | 1002             | 1077  | 1163  | 1265            |
| Литий хлористый [3, 31]    | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 778,0            | 849,0 | 934,3 | 1038            |
| Лютеций [19]               | —                 | —                | —                | —                | 1412             | 1510             | 1623             | 1755             | 1909  | 2094  | 2318            |
| Магний                     | 404,1             | 426,8            | 452,1            | 480,6            | 513,0            | 550,0            | 592,8            | 642,8            | 702,0 | 773,3 | 860,6           |
| Магний фтористый [6, 31]   | —                 | —                | —                | —                | —                | 1170             | 1245             | 1329             | 1425  | 1537  | 1667            |
| Магний хлористый [31]      | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 790,1            | 842,1            | 901,5 | 969,8 | 1049            |
| Марганец                   | 731,5             | 770,8            | 814,6            | 863,6            | 918,8            | 981,7            | 1053             | 1137             | 1235  | 1351  | 1491            |
| Медь                       | 889,1             | 937,8            | 992,1            | 1053             | 1122             | 1200             | 1291             | 1396             | 1520  | 1668  | 1849            |
| Метан                      | —                 | —                | 31,7             | 33,9             | 36,5             | 39,4             | 42,9             | 47,1             | 52,1  | 58,3  | 66,3            |
| Молибден                   | 1664              | 1751             | 1848             | 1955             | 2076             | 2213             | 2370             | 2550             | 2759  | 3007  | —               |
| Молибдена триоксид [13]    | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 798,8            | 837,3            | 879,6 | 926,4 | 978,5           |
| Мышьяк                     | 339,5             | 356,1            | 374,5            | 394,8            | 417,5            | 442,9            | 471,6            | 504,3            | 541,9 | 585,6 | 636,8           |
| Натрий                     | 306,0             | 324,2            | 344,7            | 367,9            | 394,5            | 425,2            | 461,2            | 503,7            | 554,9 | 617,7 | 696,5           |
| Натрий бромистый [25]      | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 740,8            | 802,1            | 874,5 | 961,2 | 1067            |
| Натрий фтористый [26]      | —                 | —                | —                | —                | 847,9            | 901,0            | 961,2            | 1030             | 1109  | 1202  | 1312            |
| Неодим [19]                | 899,3             | 951,2            | 1009             | 1076             | 1150             | 1236             | 1336             | 1454             | 1595  | 1766  | 1978            |
| Неон                       | —                 | —                | 7,3              | 7,8              | 8,4              | 9,1              | 9,9              | 10,9             | 12,1  | 13,6  | 15,5            |
| Нептуний [32]              | —                 | —                | —                | —                | 1548             | 1685             | 1849             | 2048             | —     | —     | —               |
| Никель                     | 848,5             | 892,0            | 940,1            | 993,7            | 1053             | 1121             | 1198             | 1287             | 1389  | 1510  | 1653            |
| Никель фтористый [33]      | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 949,3            | 1023             | 1109  | 1212  | 1335            |
| Ниобий                     | 1802              | 1895             | 1997             | 2110             | 2238             | 2382             | 2545             | 2733             | 2951  | 3206  | 3510            |
| Олово                      | 850,0             | 898,9            | 953,7            | 1015             | 1086             | 1167             | 1261             | 1372             | 1504  | 1664  | 1862            |
| Олово селенистое [34, 35]  | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 725,5            | 783,2            | 850,9 | 931,3 | 1028            |
| Олово теллуристое [34, 35] | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 757,5            | 815,1            | 882,1 | 961,2 | 1055            |
| Осмий                      | 1792              | 1882             | 1982             | 2094             | 2218             | 2359             | 2518             | 2700             | 2911  | 3158  | 3450            |
| Палладий [36, 37]          | 991,8             | 1048             | 1111             | 1182             | 1262             | 1355             | 1462             | 1588             | 1738  | 1918  | 2140            |
| Платина [3, 36]            | 1404              | 1478             | 1560             | 1650             | 1752             | 1867             | 1999             | 2150             | 2326  | 2534  | 2782            |
| Плутоний [38]              | —                 | —                | —                | —                | —                | 1351             | 1463             | 1596             | 1755  | 1949  | —               |
| Плутоний трехфтористый [6] | —                 | —                | —                | —                | —                | 1192             | 1269             | 1357             | 1458  | —     | —               |
| Полоний                    | 351,6             | 371,3            | 393,3            | 418,0            | 446,1            | 478,2            | 515,3            | 558,6            | 609,9 | 671,5 | 747,0           |
| Празеодим [19]             | —                 | —                | —                | —                | 1274             | 1371             | 1483             | 1616             | 1774  | 1967  | 2208            |
| Радий                      | 457,8             | 484,7            | 515,0            | 549,3            | 588,5            | 633,7            | 686,5            | 748,8            | 823,6 | 915,0 | 1029            |
| Рений                      | 1966              | 2070             | 2186             | 2317             | 2463             | 2630             | 2820             | 3041             | 3299  | 3604  | 3972            |
| Родий                      | 1383              | 1455             | 1535             | 1624             | 1724             | 1837             | 1966             | 2114             | 2287  | 2491  | 2734            |
| Ртуть                      | 181,9             | 192,1            | 203,5            | 216,3            | 230,9            | 247,5            | 266,7            | 289,2            | 315,8 | 347,8 | 387,0           |
| Ртуть хлористая [39]       | —                 | —                | —                | —                | —                | 275,7            | 294,4            | 315,8            | 340,5 | 369,3 | 403,6           |
| Рубидий                    | 237,0             | 251,4            | 267,6            | 286,2            | 307,5            | 332,2            | 361,2            | 395,7            | 437,6 | 489,4 | 555,1           |
| Рубидий фтористый [26]     | —                 | —                | —                | —                | 693,9            | 738,2            | 788,6            | 846,3            | 913,1 | 991,4 | 1084            |
| Рубидий хлористый          | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 799,2            | 867,0 | 947,5 | 1044            |
| Рутений                    | 1646              | 1729             | 1820             | 1922             | 2036             | 2165             | 2311             | 2478             | 2670  | 2896  | 3163            |
| Самарий                    | 573,9             | 605,7            | 641,3            | 681,4            | 726,8            | 778,7            | 838,5            | 908,4            | 990,9 | 1089  | 1210            |
| Самарий треххлористый [24] | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 751,7            | 814,9 | 889,7 | 979,7           |
| Свинец                     | 546,3             | 578,4            | 614,6            | 655,6            | 702,4            | 756,5            | 819,5            | 894,1            | 983,6 | 1092  | 1229            |
| Свинец селенистый [40]     | —                 | —                | —                | —                | —                | 725,6            | 776,5            | 835,0            | 903,0 | 983,2 | 1078            |
| Свинец теллуристый [41]    | —                 | —                | —                | —                | —                | 729,7            | 778,5            | 834,3            | 898,6 | 973,7 | 1062            |
| Свинец фтористый           | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 729,6            | 793,1            | 868,7 | 960,2 | 1073            |
| Свинца оксид               | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 885,0            | 945,2            | 1014  | 1094  | 1187            |



| Вещество                    | Давление пара, Па |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |       |       |                 |
|-----------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------|-------|-----------------|
|                             | 10 <sup>-8</sup>  | 10 <sup>-7</sup> | 10 <sup>-6</sup> | 10 <sup>-5</sup> | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-2</sup> | 10 <sup>-1</sup> | 1     | 10    | 10 <sup>2</sup> |
| Селен                       | —                 | 335,6            | 352,8            | 371,8            | 393,0            | 416,8            | 443,6            | 474,1            | 509,1 | 549,7 | 597,3           |
| Сера                        | 232,2             | 244,0            | 257,0            | 271,4            | 287,6            | 305,8            | 326,5            | 350,2            | 377,6 | 409,7 | 447,7           |
| Серебро                     | 752,5             | 793,8            | 840,0            | 891,8            | 950,4            | 1017             | 1094             | 1183             | 1289  | 1415  | 1569            |
| Серебро бромистое [25]      | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 1076             | 1149             | 1233  | 1329  | 1442            |
| Серебро теллуристое [42]    | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 1013             | 1073             | 1140  | 1216  | 1303            |
| Сероводород                 | —                 | —                | 72,8             | 77,3             | 82,4             | 88,2             | 94,9             | 102,7            | 111,9 | 122,9 | 136,3           |
| Скандий [19, 23, 43—45]     | 951,4             | 1004             | 1064             | 1130             | 1206             | 1293             | 1393             | 1511             | 1649  | 1816  | 2020            |
| Стронций                    | 453,3             | 479,2            | 508,2            | 540,9            | 578,2            | 620,9            | 670,5            | 728,7            | 797,9 | 881,6 | 985,0           |
| Стронций фтористый [6]      | —                 | —                | —                | 1160             | 1225             | 1298             | 1381             | 1474             | 1581  | —     | —               |
| Сурьма                      | 486,0             | 511,8            | 540,4            | 572,3            | 608,4            | 649,2            | 695,9            | 749,9            | 812,9 | 887,5 | 977,2           |
| Таллий                      | 490,4             | 518,8            | 550,7            | 586,7            | 627,7            | 674,9            | 729,9            | 794,5            | 871,7 | 965,5 | 1081            |
| Таллий селенистый [46]      | —                 | —                | —                | —                | 459,3            | 489,4            | 523,8            | 563,3            | 609,3 | —     | —               |
| Таллий сернистый [47]       | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 390,8            | 428,1            | 473,2 | 529,0 | —               |
| Тантал                      | 2003              | 2106             | 2221             | 2348             | 2492             | 2653             | 2838             | 3050             | 3296  | 3585  | 3929            |
| Теллур                      | 399,5             | 419,5            | 441,7            | 466,3            | 493,9            | 524,9            | 560,0            | 600,3            | 646,7 | 700,9 | 765,0           |
| Теллура диоксид [48]        | —                 | —                | —                | —                | 716,4            | 757,6            | 803,9            | 856,2            | 915,8 | 984,3 | —               |
| Тербий [19]                 | —                 | —                | —                | —                | 1295             | 1389             | 1498             | 1625             | 1776  | 1958  | 2181            |
| Титан                       | 1202              | 1264             | 1333             | 1409             | 1495             | 1591             | 1701             | 1828             | 1975  | 2147  | 2352            |
| Титан сернистый [49]        | —                 | —                | —                | —                | —                | 1692             | 1811             | 1948             | 2108  | 2296  | —               |
| Торий                       | —                 | —                | 1693             | 1799             | 1919             | 2056             | —                | —                | —     | —     | —               |
| Торий четырехфтористый [50] | —                 | —                | —                | —                | —                | 985,9            | 1047             | 1116             | 1195  | 1286  | 1392            |
| Тулий                       | 655,0             | 690,3            | 729,6            | 773,6            | 823,3            | 879,8            | 944,6            | 1019             | 1107  | 1212  | —               |
| Углерод (графит) [51]       | —                 | 1855             | 1953             | 2063             | 2185             | 2323             | 2480             | 2659             | 2867  | 3109  | 3396            |
| Углерода диоксид            | —                 | —                | 75,6             | 80,0             | 85,0             | 90,7             | 97,1             | 104,6            | 113,3 | 123,6 | 136,0           |
| Углерода оксид              | —                 | —                | 26,4             | 28,1             | 30,0             | 32,2             | 34,7             | 37,6             | 41,0  | 45,2  | 50,2            |
| Уран                        | 1252              | 1323             | 1401             | 1490             | 1591             | 1706             | 1839             | 1995             | 2180  | 2402  | 2675            |
| Урана диоксид               | —                 | —                | 1581             | 1669             | 1768             | 1879             | 2005             | —                | —     | —     | —               |
| Уран четырехфтористый       | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 1070  | 1148  | 1237            |
| Уран четыреххлористый [52]  | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 597,1            | 633,9            | 676,5 | 723,0 | —               |
| Фосфор белый                | 156,8             | 166,0            | 176,2            | 187,8            | 201,1            | 216,3            | 234,1            | 255,0            | 280,0 | 310,5 | 348,4           |
| Фосфор красный              | 296,9             | 310,3            | 325,0            | 341,2            | 359,0            | 378,8            | 400,9            | 425,7            | 453,8 | 485,9 | 522,9           |
| Франций                     | 203,7             | 216,3            | 230,5            | 246,7            | 265,3            | 286,9            | 312,5            | 343,0            | 380,1 | 426,2 | 485,0           |
| Фтор                        | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | —                | —     | 42,4  | 49,4            |
| Хлор                        | —                 | —                | 83,7             | 88,7             | 94,3             | 100,7            | 108,1            | 116,6            | 126,5 | 138,3 | 152,5           |
| Хром                        | 979,1             | 1030             | 1086             | 1149             | 1220             | 1301             | 1392             | 1498             | 1621  | 1765  | 1938            |
| Хрома оксид                 | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 1716             | 1840             | 1985  | 2154  | 2351            |
| Хром бромистый [53]         | —                 | —                | —                | —                | 698,0            | 742,3            | 792,6            | 850,2            | 916,9 | 994,9 | 1087            |
| Хром иодистый [54]          | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 826,2            | 871,0            | 920,9 | 976,9 | 1040            |
| Цезий                       | 225,4             | 239,1            | 254,7            | 272,4            | 292,8            | 316,5            | 344,3            | 377,5            | 417,8 | 467,6 | 531,1           |
| Цезий бромистый [55]        | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 696,7            | 747,4            | 806,2 | 874,9 | 956,5           |
| Цезий иодистый [55]         | —                 | —                | —                | —                | —                | 644,0            | 687,6            | 737,5            | 795,1 | 862,6 | 942,6           |
| Цезий фтористый [26, 55]    | —                 | —                | —                | —                | 510,7            | 649,9            | 694,4            | 745,6            | 804,8 | 874,3 | 957,0           |
| Цезий хлористый [55, 56]    | —                 | —                | —                | 581,0            | 617,3            | 658,3            | 705,2            | 759,2            | 822,3 | 896,3 | 986,1           |
| Церий                       | —                 | —                | —                | —                | 1306             | 1391             | 1487             | 1598             | 1727  | 1879  | 2059            |
| Цинк                        | 354,9             | 374,6            | 396,6            | 421,3            | 449,4            | 481,4            | 518,3            | 561,4            | 612,3 | 673,3 | 747,9           |
| Цинк бромистый [25]         | —                 | —                | —                | —                | 394,9            | 421,9            | 452,9            | 488,7            | 530,7 | 580,6 | 640,8           |
| Цинк мышьяковистый [59]     | —                 | —                | —                | —                | 517,9            | 555,1            | 598,2            | 648,5            | —     | —     | —               |
| Цинк селенистый             | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 911,6            | 974,1            | 1045  | 1128  | —               |
| Цинк сернистый              | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | —                | —                | 1127  | 1252  | 1408            |
| Цинк теллуристый            | —                 | —                | —                | —                | —                | —                | 778,2            | 839,6            | 911,4 | 996,6 | —               |
| Цирконий                    | 1565              | 1648             | 1741             | 1846             | 1963             | 2096             | 2249             | 2426             | 2633  | 2878  | 3174            |
| Эрбий [19]                  | —                 | —                | —                | —                | 1128             | 1207             | 1298             | 1403             | 1527  | 1674  | 1854            |

Таблица 11.3. Температура насыщения неорганических веществ, К;  $p = 0,1 \div 100$  кПа [3]  
В таблице приведены значения температуры, К, при которых устанавливается указанное давление пара

| Вещество                      | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Азот                          | 46,0               | 47,9  | 50,7  | 53,0  | 55,5  | 59,3  | 62,5  | 66,1  | 71,5  | 76,2  |
| Азота закись                  | 127,9              | 132,0 | 137,7 | 142,4 | 147,4 | 154,6 | 160,5 | 166,9 | 176,1 | 183,9 |
| Азота оксид                   | 85,6               | 88,2  | 91,7  | 94,6  | 97,7  | 102,1 | 105,7 | 109,6 | 115,2 | 119,8 |
| Азота фтороксид               | 127,0              | 131,9 | 138,8 | 144,6 | 150,8 | 160,0 | 167,7 | 176,2 | 188,9 | 199,7 |
| Азота тетраоксид              | 213,1              | 218,9 | 227,0 | 233,5 | 240,4 | 240,2 | 258,1 | 266,6 | 278,7 | 288,6 |
| Азотный ангидрид              | 234,0              | 239,6 | 247,5 | 253,8 | 260,5 | 269,8 | 277,3 | 285,3 | 296,5 | 305,6 |
| Азот трехфтористый [3, 60]    | 87,3               | 90,8  | 96,0  | 100,4 | 105,2 | 112,2 | 118,2 | 124,8 | 134,8 | 143,6 |
| Алюминий                      | 1719               | 1780  | 1868  | 1941  | 2019  | 2133  | 2228  | 2332  | 2486  | 2616  |
| Алюминий-боргидрид            | —                  | 205,4 | 216,7 | 226,1 | 236,4 | 251,5 | 264,2 | 278,3 | 299,5 | 317,8 |
| Алюминий бромистый            | 343,3              | 355,5 | 372,9 | 387,3 | 402,8 | 425,3 | 444,1 | 464,6 | 494,9 | 520,5 |
| Алюминий иодистый             | 439,7              | 454,5 | 475,7 | 493,0 | 511,7 | 538,7 | 561,1 | 585,4 | 621,0 | 650,9 |
| Алюминий однофтористый [61]   | 1253               | 1266  | 1283  | 1297  | 1310  | 1329  | 1343  | 1357  | —     | —     |
| Алюминий фтористый            | 1496               | 1521  | 1557  | 1585  | 1614  | 1654  | 1685  | 1718  | 1763  | 1799  |
| Алюминий хлористый            | 369,8              | 376,8 | 386,4 | 394,0 | 401,9 | 412,9 | 421,6 | 430,6 | 443,3 | 453,3 |
| Алюминия оксид                | 2394               | 2459  | 2551  | 2624  | 2702  | 2813  | 2903  | 2998  | 3135  | 3247  |
| Америций [4]                  | 1649               | 1718  | 1820  | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| Аммиак                        | 159,7              | 165,1 | 172,7 | 178,9 | 185,7 | 195,4 | 203,4 | 212,2 | 224,9 | 235,7 |
| Аммоний бромистый             | 465,2              | 479,9 | 500,8 | 517,9 | 536,1 | 562,3 | 583,9 | 607,2 | 641,1 | 669,3 |
| Аммоний иодистый              | 473,4              | 488,4 | 509,8 | 527,2 | 545,9 | 572,8 | 594,9 | 618,8 | 653,6 | 682,5 |
| Аммоний кислый сернистый      | 218,8              | 225,2 | 234,2 | 241,6 | 249,4 | 260,5 | 269,7 | 279,4 | 293,5 | 305,1 |
| Аммоний хлористый             | 428,4              | 441,8 | 460,7 | 476,1 | 492,6 | 516,2 | 535,7 | 556,6 | 587,0 | 612,3 |
| Аммоний цианистый             | 219,4              | 225,6 | 234,5 | 241,7 | 249,4 | 260,3 | 269,1 | 278,7 | 292,3 | 303,6 |
| Аммония азид                  | 299,3              | 307,4 | 318,9 | 328,2 | 338,1 | 352,0 | 363,4 | 375,5 | 392,8 | 407,0 |
| Аммония карбамат              | 243,9              | 250,5 | 259,8 | 267,4 | 275,4 | 286,7 | 295,9 | 305,7 | 319,7 | 331,2 |
| Аргон                         | 53,2               | 55,3  | 58,4  | 61,1  | 63,9  | 68,1  | 71,7  | 75,7  | 81,7  | 86,9  |
| Арсин [62]                    | 143,3              | 150,4 | 160,9 | 169,9 | 180,0 | 195,3 | 208,7 | 224,1 | 248,2 | 270,3 |
| Астат                         | 427,7              | 441,0 | 459,7 | 475,0 | 491,4 | 514,8 | 534,1 | 554,9 | 584,9 | 609,9 |
| Барий                         | 1113               | 1161  | 1232  | 1291  | 1357  | 1455  | 1538  | 1632  | 1775  | 1902  |
| Барий хлористый [63]          | 1533               | 1590  | 1672  | 1740  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| Бериллий                      | 1793               | 1857  | 1949  | 2025  | 2108  | 2228  | 2328  | 2438  | 2599  | 2737  |
| Бериллий-боргидрид            | 272,3              | 279,4 | 289,4 | 297,4 | 305,8 | 317,8 | 327,4 | 337,7 | 352,7 | 364,3 |
| Бериллий бромистый            | 556,5              | 571,0 | 591,5 | 608,1 | 625,5 | 650,2 | 670,2 | 691,5 | 721,8 | 746,5 |
| Бериллий иодистый             | 550,3              | 566,0 | 588,2 | 606,1 | 625,2 | 652,3 | 674,5 | 698,2 | 732,2 | 760,3 |
| Бериллий фтористый [8, 9]     | 1022               | 1052  | 1094  | 1128  | 1164  | 1216  | 1258  | —     | —     | —     |
| Бериллий хлористый            | 557,6              | 572,8 | 594,1 | 611,4 | 629,7 | 655,6 | 676,7 | 699,1 | 731,3 | 757,6 |
| Бор                           | 2859               | 2950  | 3079  | 3185  | 3299  | 3461  | 3596  | 3741  | 3952  | 4128  |
| Бор трихлористый [64]         | 301,4              | 313,1 | 329,9 | 343,9 | 359,1 | 381,4 | 400,2 | 421,0 | 452,0 | 478,6 |
| Бор трехфтористый             | 116,3              | 120,2 | 125,7 | 130,3 | 135,2 | 142,2 | 148,0 | 154,3 | 163,6 | 171,4 |
| Бор треххлористый             | 177,8              | 184,7 | 194,7 | 203,0 | 212,0 | 225,3 | 236,5 | 248,9 | 267,4 | 283,3 |
| Бром                          | 216,5              | 224,1 | 234,9 | 243,8 | 253,4 | 267,4 | 279,0 | 291,7 | 310,3 | 326,1 |
| Бромдихлорфторсилан           | 182,2              | 189,9 | 201,1 | 210,5 | 220,8 | 236,1 | 249,1 | 263,7 | 285,8 | 305,2 |
| Бром пятифтористый [65]       | 197,8              | 205,4 | 216,4 | 225,5 | 235,4 | 250,0 | 262,2 | 275,7 | 295,8 | 313,1 |
| Бромсилан                     | —                  | 173,8 | 183,7 | 192,1 | 201,2 | 214,7 | 226,1 | 238,8 | 258,1 | 274,8 |
| Ванадий                       | 2519               | 2600  | 2716  | 2810  | 2912  | 3057  | 3177  | 3308  | 3497  | 3655  |
| Ванадия окситрифторид [66]    | —                  | —     | —     | —     | —     | —     | 336,4 | 349,6 | 368,7 | 384,6 |
| Ванадия окситрихлорид [3, 67] | 244,7              | 254,6 | 268,9 | 280,8 | 293,9 | 313,2 | 329,5 | 347,6 | 374,9 | 398,6 |
| Висмут                        | 1030               | 1072  | 1134  | 1185  | 1241  | 1324  | 1395  | 1473  | 1592  | 1695  |
| Висмут пятифтористый          | 343,4              | 354,7 | 370,8 | 383,9 | 398,1 | 418,5 | 435,4 | 453,7 | 480,4 | 502,7 |
| Висмут трехбромистый          | —                  | 501,3 | 525,6 | 545,6 | 567,2 | 598,5 | 624,5 | 653,0 | 694,8 | 730,2 |
| Висмут трихлористый           | 519,6              | 539,2 | 567,4 | 590,8 | 616,3 | 653,5 | 684,7 | 719,1 | 770,3 | 814,1 |
| Висмут хрехлористый           | —                  | 484,4 | 508,3 | 528,0 | 549,4 | 580,3 | 606,2 | 634,5 | 676,2 | 711,5 |
| Вода                          | 250,8              | 259,2 | 271,2 | 281,1 | 291,7 | 307,1 | 319,8 | 333,7 | 353,9 | 370,9 |
| Вода (дейтериевая)            | —                  | —     | 271,7 | 281,8 | 292,7 | 308,4 | 321,5 | 335,7 | 356,5 | 374,1 |
| Вода (дейтероводородная)      | —                  | —     | 270,8 | 280,8 | 291,7 | 307,4 | 320,4 | 334,6 | 355,4 | 373,0 |
| Вода (тяжелокислородная)      | —                  | —     | 269,7 | 279,8 | 290,7 | 306,4 | 319,5 | 333,8 | 354,7 | 372,4 |
| Водород                       | 9,3                | 9,9   | 10,7  | 11,4  | 12,2  | 13,4  | 14,6  | 15,9  | 18,1  | 20,2  |

| Вещество                            | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 0,1                | 0,2   | 0,5   | Г     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Водород (дейтерий)                  | 11,9               | 12,5  | 13,4  | 14,2  | 15,1  | 16,5  | 17,7  | 19,1  | 21,3  | 23,4  |
| Водород (дейтероводород)            | 10,7               | 11,3  | 12,2  | 12,9  | 13,8  | 15,1  | 16,3  | 17,6  | 19,9  | 22,0  |
| Водород (тритий)                    | 13,3               | 14,0  | 15,0  | 15,8  | 16,8  | 18,3  | 19,6  | 21,1  | 23,5  | 25,7  |
| Водорода перекись                   | 282,9              | 292,8 | 307,1 | 318,9 | 331,6 | 350,1 | 365,5 | 382,3 | 407,1 | 428,0 |
| Водород бромистый                   | 131,4              | 136,3 | 143,4 | 149,2 | 155,6 | 164,8 | 172,6 | 181,1 | 193,8 | 204,6 |
| Водород двухсернистый               | 226,5              | 234,2 | 245,2 | 254,3 | 264,0 | 278,1 | 289,8 | 302,6 | 321,2 | 336,9 |
| Водород иодистый                    | 146,7              | 152,6 | 161,0 | 168,1 | 175,8 | 187,2 | 196,8 | 207,4 | 223,4 | 237,2 |
| Водород мышьяковистый               | 127,2              | 132,4 | 139,9 | 146,2 | 153,1 | 163,3 | 171,9 | 181,5 | 196,0 | 208,6 |
| Водород селенистый                  | 154,0              | 159,2 | 166,6 | 172,7 | 179,2 | 188,6 | 196,5 | 205,0 | 217,4 | 227,9 |
| Водород теллуристый                 | 171,9              | 178,2 | 187,4 | 194,9 | 203,1 | 215,1 | 225,1 | 236,1 | 252,5 | 266,4 |
| Водород фтористый                   | 175,4              | 182,7 | 193,4 | 202,3 | 212,2 | 226,7 | 239,1 | 252,9 | 273,9 | 292,2 |
| Водород хлористый                   | 119,3              | 123,8 | 130,2 | 135,5 | 141,3 | 149,7 | 156,8 | 164,5 | 176,1 | 185,9 |
| Вольфрам                            | 4098               | 4214  | 4377  | 4510  | 4650  | 4850  | 5013  | 5188  | 5438  | 5643  |
| Вольфрам окситетрахлорид [68]       | 374,2              | 383,6 | 396,7 | 407,2 | 418,3 | 434,0 | 446,6 | 460,0 | 478,9 | 494,4 |
| Вольфрам пятибромистый [69]         | 436,2              | 451,4 | 473,2 | 491,2 | 510,5 | 538,6 | 562,0 | 587,5 | 624,9 | 656,6 |
| Вольфрам пятихлористый [70]         | —                  | 406,0 | 423,0 | 436,9 | 451,6 | 472,8 | 490,1 | 508,8 | 535,7 | 558,1 |
| Вольфрам шестифтористый             | 198,2              | 204,5 | 213,5 | 220,9 | 228,8 | 240,1 | 249,4 | 259,5 | 274,2 | 286,5 |
| Вольфрам шестихлористый [68]        | 414,6              | 428,1 | 447,5 | 463,4 | 480,4 | 504,9 | 525,2 | 547,2 | 579,2 | 606,0 |
| Гадолиний                           | 2280               | 2420  | 2634  | 2823  | 3041  | 3386  | 3704  | 4088  | 4738  | 5385  |
| Галлий                              | 1596               | 1656  | 1743  | 1815  | 1894  | 2009  | 2105  | 2211  | 2369  | 2504  |
| Галлий треххлористый                | 309,8              | 320,6 | 336,1 | 348,8 | 362,6 | 382,5 | 399,1 | 417,3 | 443,9 | 466,4 |
| Гафний                              | 3370               | 3518  | 3734  | 3916  | 4117  | 4416  | 4673  | 4961  | 5403  | 5792  |
| Гафний четыреххлористый [3, 71, 72] | 441,0              | 452,5 | 468,6 | 481,6 | 495,4 | 514,7 | 530,5 | 547,1 | 570,9 | 590,3 |
| Гексаборан [73]                     | 234,9              | 243,3 | 255,2 | 265,1 | 275,8 | 291,3 | 304,2 | 318,4 | 339,2 | 356,9 |
| Гексафторидсилан                    | 190,2              | 195,1 | 202,1 | 207,6 | 213,5 | 221,9 | 228,6 | 235,8 | 246,0 | 254,3 |
| Гексахлоридсилан                    | 272,9              | 282,4 | 296,1 | 307,4 | 319,6 | 337,3 | 352,0 | 368,0 | 391,7 | 411,7 |
| Гексахлордисилоксан                 | 267,0              | 276,3 | 289,6 | 300,6 | 312,4 | 329,6 | 343,9 | 359,4 | 382,3 | 401,7 |
| Гелий                               | 1,2                | 1,3   | 1,5   | 1,6   | 1,8   | 2,1   | 2,4   | 2,8   | 3,6   | 4,6   |
| Германий                            | 2044               | 2117  | 2222  | 2309  | 2403  | 2540  | 2654  | 2778  | 2963  | 3119  |
| Германий бромистый                  | —                  | 293,2 | 309,7 | 323,4 | 338,5 | 360,6 | 379,4 | 400,2 | 431,6 | 458,8 |
| Германий хлористый                  | 222,9              | 231,5 | 243,9 | 254,2 | 265,4 | 281,8 | 295,6 | 310,8 | 333,6 | 353,2 |
| Германия гидрид                     | 108,2              | 112,8 | 119,6 | 125,4 | 131,7 | 141,0 | 149,1 | 158,0 | 171,7 | 183,8 |
| Гидроксиланин                       | —                  | 298,8 | 308,8 | 316,8 | 325,2 | 337,1 | 346,6 | 356,8 | 371,1 | 382,7 |
| Дейтсроаммиак                       | —                  | —     | —     | —     | —     | 192,9 | 201,9 | 211,9 | 226,7 | 239,3 |
| Дейтеродиборан [74]                 | 109,0              | 113,5 | 119,9 | 125,3 | 131,1 | 139,8 | 147,1 | 155,3 | 167,6 | 178,3 |
| Диборан [3, 74, 75, 76]             | 109,2              | 113,7 | 120,3 | 125,7 | 131,7 | 140,5 | 148,1 | 156,4 | 169,0 | 180,0 |
| Дибромдифторсилан                   | —                  | —     | 193,4 | 201,9 | 211,2 | 224,9 | 236,6 | 249,5 | 268,8 | 285,6 |
| Дибромсилан                         | 208,1              | 216,6 | 229,0 | 239,3 | 250,7 | 267,4 | 281,6 | 297,4 | 321,2 | 342,0 |
| Дибромхлорфторсилан                 | 203,6              | 211,8 | 223,7 | 233,7 | 244,5 | 260,6 | 274,2 | 289,2 | 312,0 | 331,6 |
| Дигерман                            | 180,8              | 188,5 | 199,6 | 208,9 | 219,2 | 234,4 | 247,4 | 261,9 | 283,9 | 303,2 |
| Дигидродекаборан                    | 324,1              | 334,4 | 349,0 | 360,9 | 373,7 | 392,1 | 407,2 | 423,5 | —     | —     |
| Дигидропентаборан                   | —                  | 217,1 | 228,7 | 238,3 | 248,7 | 264,1 | 277,0 | 291,2 | 312,5 | 330,7 |
| Дниодсилан                          | —                  | 256,4 | 272,4 | 285,8 | 300,7 | 323,0 | 342,2 | 363,7 | 396,8 | 426,1 |
| Дисилазан                           | 200,4              | 208,2 | 219,5 | 228,9 | 239,2 | 254,2 | 266,9 | 280,9 | 301,9 | 319,9 |
| Дисилан                             | 154,9              | 161,4 | 170,8 | 178,6 | 187,3 | 200,1 | 211,0 | 223,1 | 241,5 | 257,6 |
| Дисилоксан                          | 158,1              | 164,5 | 173,7 | 181,4 | 189,9 | 202,3 | 212,8 | 224,4 | 242,0 | 257,2 |
| Диспрозий [77]                      | 1750               | 1810  | 2000  | 2060  | 2140  | 2300  | 2430  | 2590  | 2720  | 2880  |
| Дифторсилан                         | 123,6              | 128,3 | 135,0 | 140,6 | 146,7 | 155,6 | 163,0 | 171,3 | 183,5 | 193,9 |
| Дихлордифторсилан                   | 145,3              | 151,3 | 160,2 | 167,5 | 175,6 | 187,6 | 197,8 | 209,2 | 226,4 | 241,5 |
| Европий                             | 1074               | 1116  | 1178  | 1230  | 1286  | 1369  | 1440  | 1517  | 1634  | 1735  |
| Европий хлористый [78]              | 1549               | 1608  | 1694  | 1765  | 1843  | 1957  | 2052  | 2158  | 2316  | 2451  |
| Железа карбонил                     | —                  | 248,8 | 262,0 | 273,0 | 284,9 | 302,4 | 317,0 | 333,2 | 357,4 | 378,1 |
| Железо                              | 2031               | 2101  | 2201  | 2283  | 2371  | 2499  | 2605  | 2721  | 2891  | 3034  |
| Железо бромистое [79]               | 825,2              | 853,0 | 892,8 | 925,5 | 960,6 | 1011  | 1053  | 1099  | 1166  | 1222  |
| Железо хлористое                    | —                  | —     | 917,1 | 953,3 | 992,5 | 1049  | 1097  | 1149  | 1226  | 1292  |
| Железо хлорное                      | 465,5              | 475,5 | 489,4 | 500,5 | 512,1 | 528,3 | 541,2 | 554,7 | 573,7 | 589,0 |
| Золото                              | 2025               | 2099  | 2204  | 2291  | 2385  | 2522  | 2636  | 2762  | 2947  | 3105  |
| Индий                               | 1452               | 1508  | 1589  | 1656  | 1730  | 1837  | 1928  | 2029  | 2178  | 2307  |

| Вещество                            | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Индий хлористый [80]                | 602,4              | 623,6 | 654,1 | 679,3 | 706,4 | —     | —     | —     | —     | —     |
| Индия сульфид [81]                  | 1265               | 1303  | 1358  | 1402  | 1449  | 1517  | 1572  | 1631  | —     | —     |
| Иод                                 | 304,7              | 314,8 | 329,3 | 341,1 | 353,9 | 372,3 | 387,5 | 404,0 | 428,1 | 448,4 |
| Иод пятифтористый                   | 245,8              | 254,5 | 267,0 | 277,3 | 288,5 | 304,6 | 318,1 | 332,9 | 354,7 | 373,1 |
| Иодсилан                            | —                  | 204,4 | 215,8 | 225,2 | 235,5 | 250,7 | 263,5 | 277,7 | 299,0 | 317,4 |
| Иридий                              | 3033               | 3133  | 3274  | 3390  | 3514  | 3693  | 3841  | 4001  | 4235  | 4431  |
| Иттербий                            | 912,7              | 945,9 | 993,8 | 1033  | 1076  | 1138  | 1190  | 1248  | 1332  | 1405  |
| Иттербий хлористый [78]             | 1510               | 1571  | 1659  | 1733  | 1814  | 1932  | 2033  | 2145  | 2313  | 2459  |
| Иттрий                              | 2362               | 2443  | 2560  | 2657  | 2760  | 2910  | 3035  | 3172  | 3371  | 3540  |
| Кадмий                              | 655,9              | 681,0 | 717,3 | 747,4 | 780,2 | 828,2 | 868,6 | 913,1 | 979,6 | 1036  |
| Кадмий бромистый [82]               | 727,9              | 756,9 | 799,0 | 834,0 | 872,2 | 928,5 | —     | —     | —     | —     |
| Кадмий иодистый                     | 678,1              | 703,8 | 741,0 | 771,8 | 805,3 | 854,4 | 895,6 | 941,0 | 1008  | 1066  |
| Кадмий фтористый                    | 1636               | 1683  | 1750  | 1805  | 1863  | 1945  | 2012  | 2084  | 2188  | 2274  |
| Кадмий хлористый [3, 83]            | 804,9              | 834,0 | 875,9 | 910,6 | 948,0 | 1002  | 1048  | 1098  | 1172  | 1234  |
| Кадмия диметил [84, 85]             | 242,9              | 251,8 | 264,6 | 275,2 | 286,6 | 303,3 | 317,2 | 332,5 | 355,2 | 374,5 |
| Кадмия оксид                        | 1255               | 1295  | 1354  | 1401  | 1452  | 1526  | 1587  | 1653  | 1749  | 1829  |
| Калий                               | 606,6              | 633,1 | 672,0 | 704,7 | 740,8 | 794,5 | 840,7 | 892,5 | 971,7 | 1041  |
| Калий бромистый                     | 1046               | 1086  | 1143  | 1191  | 1243  | 1319  | 1383  | 1454  | 1559  | 1649  |
| Калий едкий                         | 972,1              | 1011  | 1068  | 1116  | 1168  | 1246  | 1311  | 1384  | 1493  | 1589  |
| Калий иодистый                      | 999,5              | 1038  | 1094  | 1140  | 1190  | 1265  | 1327  | 1396  | 1499  | 1588  |
| Калий фтористый                     | 1138               | 1180  | 1241  | 1291  | 1345  | 1425  | 1491  | 1564  | 1673  | 1766  |
| Калий хлористый                     | 1075               | 1115  | 1172  | 1220  | 1272  | 1348  | 1411  | 1481  | 1584  | 1673  |
| Кальций                             | 1060               | 1104  | 1168  | 1221  | 1280  | 1366  | 1440  | 1522  | 1646  | 1754  |
| Кальций хлористый [63]              | 1467               | 1516  | 1586  | 1643  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| Карбонилборин                       | 131,2              | 136,3 | 143,6 | 149,7 | 156,4 | 166,1 | 174,3 | 183,3 | 196,8 | 208,5 |
| Карбонилхлорид (фосген)             | 176,3              | 183,1 | 192,8 | 200,9 | 209,8 | 222,7 | 233,5 | 245,5 | 263,4 | 278,8 |
| Кислород                            | 53,0               | 55,3  | 58,6  | 61,3  | 64,4  | 68,9  | 72,8  | 77,1  | 83,7  | 89,5  |
| Кобальт                             | 1717               | 1774  | 1855  | 1921  | 1992  | 2095  | 2180  | 2272  | 2406  | 2519  |
| Кобальта нитрозилтрикар-<br>бонил   | —                  | —     | —     | 255,7 | 266,7 | 282,8 | 296,4 | 311,3 | 333,4 | 352,4 |
| Кобальт хлористый                   | —                  | —     | —     | —     | 974,4 | 1038  | 1091  | 1151  | 1241  | 1319  |
| Кремний                             | 1908               | 1975  | 2071  | 2151  | 2236  | 2361  | 2465  | 2578  | 2745  | 2886  |
| Кремний четырехиодис-<br>тый [64]   | 357,4              | 371,3 | 391,4 | 408,2 | 426,4 | 453,1 | 475,7 | 500,6 | 537,9 | 570,0 |
| Кремний четырехфторис-<br>тый       | 127,5              | 131,2 | 136,6 | 140,9 | 145,5 | 152,1 | 157,4 | 163,2 | 171,5 | 178,4 |
| Кремний четыреххлорис-<br>тый       | 205,6              | 213,6 | 225,2 | 234,8 | 245,2 | 260,6 | 273,5 | 287,8 | 309,2 | 327,6 |
| Кремния оксид                       | —                  | —     | 1918  | 1979  | 2043  | 2134  | 2209  | 2289  | 2404  | 2500  |
| Криптон                             | 73,6               | 76,6  | 80,8  | 84,4  | 88,3  | 94,1  | 98,9  | 104,3 | 112,5 | 119,5 |
| Ксенон                              | 103,3              | 107,3 | 113,1 | 118,0 | 123,3 | 131,0 | 137,6 | 144,8 | 155,6 | 165,0 |
| Лантан                              | 2428               | 2516  | 2642  | 2746  | 2858  | 3022  | 3158  | 3308  | 3529  | 3717  |
| Литий                               | 999,4              | 1038  | 1095  | 1142  | 1193  | 1269  | 1332  | 1403  | 1508  | 1599  |
| Литий бромистый                     | 1003               | 1041  | 1096  | 1141  | 1190  | 1263  | 1323  | 1390  | 1490  | 1575  |
| Литий иодистый                      | 981,3              | 1013  | 1060  | 1098  | 1138  | 1197  | 1246  | 1298  | 1375  | 1440  |
| Литий фтористый                     | 1299               | 1344  | 1408  | 1461  | 1518  | 1601  | 1669  | 1744  | 1854  | 1947  |
| Литий хлористый                     | 1038               | 1077  | 1135  | 1183  | 1235  | 1312  | 1377  | 1448  | 1554  | 1645  |
| Лютеций                             | 2258               | 2371  | 2538  | 2681  | 2841  | 3085  | 3298  | 3544  | 3931  | 4285  |
| Магний                              | 858,4              | 891,8 | 940,2 | 980,3 | 1024  | 1088  | 1142  | 1202  | 1292  | 1369  |
| Магний хлористый                    | 1030               | 1071  | 1131  | 1182  | 1237  | 1318  | 1387  | 1463  | 1578  | 1678  |
| Марганец                            | 1494               | 1551  | 1635  | 1704  | 1780  | 1891  | 1984  | 2087  | 2241  | 2373  |
| Марганец хлористый                  | —                  | 936,3 | 988,3 | 1031  | 1079  | 1148  | 1208  | 1273  | 1371  | 1456  |
| Медь                                | 1850               | 1929  | 2044  | 2141  | 2247  | 2404  | 2539  | 2689  | 2918  | 3118  |
| Медь бромистая                      | 814,8              | 856,3 | 918,0 | 971,0 | 1030  | 1121  | 1201  | 1293  | 1439  | 1574  |
| Медь иодистая                       | —                  | 786,5 | 849,2 | 903,6 | 965,5 | 1061  | 1148  | 1249  | 1415  | 1573  |
| Медь хлористая                      | 783,7              | 827,7 | 894,1 | 951,8 | 1017  | 1119  | 1211  | 1320  | 1497  | 1666  |
| Молибден                            | 3326               | 3444  | 3614  | 3755  | 3906  | 4126  | 4310  | 4511  | 4807  | 5058  |
| Молибдена диоксихлорид<br>[86]      | 332,1              | 340,1 | 351,3 | 360,3 | 369,8 | 383,0 | 393,8 | 405,1 | 421,1 | 434,0 |
| Молибдена окситетра-<br>хлорид [68] | 328,3              | 341,4 | 360,3 | 376,0 | 393,2 | 418,5 | 439,8 | 463,5 | 499,1 | 529,8 |
| Молибдена триоксид                  | 971,0              | 1001  | 1045  | 1080  | 1118  | 1173  | 1218  | 1267  | 1337  | 1396  |
| Молибден пятихлористый<br>[68]      | 355,4              | 368,4 | 387,1 | 402,5 | 419,2 | 443,6 | 464,0 | 486,4 | 519,5 | 547,7 |

| Вещество                      | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Молибден шестифтористый       | 203,7              | 210,7 | 220,7 | 229,0 | 237,8 | 250,7 | 261,4 | 273,0 | 290,1 | 304,5 |
| Монобромдиборан               | 176,8              | 184,0 | 194,4 | 203,1 | 212,7 | 226,7 | 238,6 | 251,9 | 271,8 | 289,1 |
| Моногерман [87]               | 109,4              | 114,0 | 120,8 | 126,5 | 132,8 | 142,0 | 150,0 | 158,8 | 172,3 | 184,1 |
| Мышьяк                        | 635,4              | 653,8 | 679,8 | 700,8 | 723,3 | 755,2 | 781,3 | 809,3 | 849,5 | 882,6 |
| Мышьяка триоксид              | 466,4              | 483,0 | 506,9 | 526,5 | 547,7 | 578,6 | 604,3 | 632,4 | 673,9 | 709,1 |
| Мышьяк пятифтористый          | 151,1              | 155,8 | 162,4 | 167,8 | 173,6 | 181,9 | 188,7 | 196,0 | 206,6 | 215,4 |
| Мышьяк трехбромистый          | 309,0              | 320,9 | 338,2 | 352,5 | 368,1 | 391,0 | 410,3 | 431,6 | 463,4 | 490,7 |
| Мышьяк трехиодистый [88]      | 405,2              | 420,5 | 442,7 | 461,2 | 481,2 | 510,5 | 535,1 | 562,2 | 602,7 | 637,3 |
| Мышьяк трехсернистый [89]     | 533,8              | 556,9 | 590,8 | 619,2 | 650,6 | 697,3 | 737,3 | 782,2 | 850,7 | 911,0 |
| Мышьяк трехфтористый          | —                  | —     | —     | —     | 255,3 | 269,5 | 281,3 | 294,2 | 313,1 | 329,1 |
| Мышьяк треххлористый          | 256,7              | 266,4 | 280,3 | 291,8 | 304,3 | 322,6 | 337,9 | 354,8 | 379,9 | 401,4 |
| Натрий                        | 697,8              | 726,9 | 769,2 | 804,6 | 843,5 | 901,0 | 950,0 | 1004  | 1087  | 1159  |
| Натрий бромистый              | 1060               | 1100  | 1157  | 1205  | 1256  | 1331  | 1395  | 1464  | 1567  | 1656  |
| Натрий иодистый               | 1022               | 1059  | 1113  | 1157  | 1205  | 1274  | 1332  | 1396  | 1490  | 1570  |
| Натрий фтористый              | 1329               | 1374  | 1439  | 1491  | 1548  | 1630  | 1698  | 1772  | 1881  | 1972  |
| Натрий хлористый              | 1119               | 1160  | 1220  | 1269  | 1322  | 1400  | 1465  | 1536  | 1642  | 1733  |
| Натрий цианистый              | 1071               | 1115  | 1180  | 1233  | 1292  | 1380  | 1454  | 1537  | 1661  | 1770  |
| Натрия гидрооксид             | 995,2              | 1036  | 1096  | 1147  | 1202  | 1283  | 1353  | 1430  | 1548  | 1650  |
| Неодим                        | 2001               | 2091  | 2223  | 2335  | 2458  | 2643  | 2803  | 2982  | 3259  | 3505  |
| Неон                          | 15,6               | 16,3  | 17,3  | 18,1  | 19,0  | 20,4  | 21,6  | 23,0  | 25,0  | 26,8  |
| Нептуний [2]                  | 2538               | 2636  | 2778  | 2895  | 3023  | 3211  | 3369  | 3543  | 3804  | 4028  |
| Нептуний шестифтористый       | 236,8              | 243,6 | 253,1 | 260,9 | 269,2 | 280,9 | 290,5 | 300,8 | 315,5 | 327,7 |
| Никель                        | 1656               | 1710  | 1786  | 1849  | 1916  | 2012  | 2092  | 2178  | 2303  | 2408  |
| Никель хлористый              | 932,8              | 957,5 | 992,3 | 1020  | 1050  | 1091  | 1125  | 1162  | 1213  | 1255  |
| Никеля карбонил               | —                  | —     | —     | —     | 233,7 | 248,8 | 261,6 | 275,8 | 297,0 | 315,4 |
| Ниобий                        | 3529               | 3642  | 3803  | 3934  | 4075  | 4277  | 4444  | 4625  | 4887  | 5106  |
| Ниобий пятибромистый [90]     | 451,4              | 464,2 | 482,3 | 497,0 | 512,5 | 534,7 | 552,8 | 572,1 | 599,8 | 622,6 |
| Ниобий пятифтористый          | —                  | —     | 338,1 | 352,9 | 369,1 | 392,8 | 412,9 | 435,2 | 468,6 | 497,6 |
| Ниобий пятихлористый [90, 91] | —                  | —     | 381,4 | 395,1 | 409,8 | 431,1 | 448,8 | 467,9 | 495,9 | 519,3 |
| Нитрозил фтористый            | 137,9              | 143,0 | 150,4 | 156,6 | 163,2 | 172,9 | 181,1 | 190,1 | 203,4 | 214,7 |
| Нитрозил хлористый            | —                  | —     | —     | —     | 199,4 | 211,9 | 222,4 | 234,0 | 251,4 | 266,4 |
| Озон                          | 91,7               | 95,9  | 102,0 | 107,2 | 112,9 | 121,5 | 128,9 | 137,3 | 150,3 | 161,8 |
| Октахлортрисилан              | 314,7              | 326,2 | 342,7 | 356,4 | 371,2 | 392,8 | 410,8 | 430,6 | 459,9 | 484,9 |
| Олова гидрид                  | 130,9              | 136,5 | 144,6 | 151,4 | 158,9 | 170,1 | 179,6 | 190,3 | 206,5 | 220,7 |
| Олово                         | 1853               | 1926  | 2031  | 2119  | 2215  | 2355  | 2474  | 2605  | 2802  | 2972  |
| Олово бромное                 | —                  | 308,5 | 325,4 | 339,4 | 354,7 | 377,2 | 396,2 | 417,2 | 448,6 | 475,7 |
| Олово иодное                  | —                  | 399,7 | 421,9 | 440,4 | 460,6 | 490,4 | 515,5 | 543,4 | 585,3 | 621,5 |
| Олово сернистое [92]          | 1029               | 1062  | 1110  | 1149  | 1190  | 1250  | 1300  | 1354  | 1432  | 1497  |
| Олово хлористое               | 578,0              | 599,1 | 629,4 | 654,4 | 681,6 | 721,1 | 754,2 | 790,5 | 844,1 | 889,8 |
| Олово хлорное                 | 245,4              | 254,6 | 267,8 | 278,7 | 290,6 | 308,0 | 322,6 | 338,6 | 362,4 | 382,7 |
| Осмий                         | 3475               | 3579  | 3727  | 3846  | 3974  | 4157  | 4306  | 4467  | 4699  | 4891  |
| Осмия тетраоксид:             |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| белый                         | 261,2              | 270,6 | 284,1 | 295,2 | 307,2 | 324,7 | 339,3 | 355,2 | 378,8 | 398,8 |
| желтый                        | 268,3              | 277,2 | 290,0 | 300,5 | 311,8 | 328,0 | 341,5 | 356,2 | 377,6 | 395,5 |
| Палладий                      | 2214               | 2293  | 2408  | 2502  | 2604  | 2752  | 2876  | 3012  | 3212  | 3382  |
| Пентаборан [93]               | 207,9              | 215,9 | 227,6 | 237,3 | 247,9 | 263,4 | 276,5 | 290,9 | 312,5 | 331,1 |
| Пентадейтероборан [93]        | 207,1              | 215,1 | 226,8 | 236,5 | 247,0 | 262,5 | 275,5 | 289,9 | 311,5 | 330,1 |
| Перхлорилфторид [94, 95]      | 140,6              | 146,1 | 154,1 | 160,7 | 167,9 | 178,4 | 187,4 | 197,2 | 212,0 | 224,7 |
| Платина                       | 2772               | 2859  | 2983  | 3085  | 3193  | 3349  | 3478  | 3616  | 3817  | 3985  |
| Платина шестифтористая [96]   | 230,6              | 238,2 | 249,0 | 257,8 | 267,3 | 281,0 | 292,3 | 304,5 | 322,4 | 337,4 |
| Плутоний                      | 2193               | 2278  | 2402  | 2505  | 2617  | 2782  | 2921  | 3075  | 3305  | 3503  |
| Плутоний шестифтористый       | —                  | —     | —     | 261,7 | 270,4 | 282,9 | 293,2 | 304,2 | 320,1 | 333,3 |
| Полоний                       | 757,9              | 788,3 | 832,5 | 869,4 | 909,7 | 969,1 | 1019  | 1075  | 1159  | 1231  |
| Протактиний                   | 2937               | 3042  | 3193  | 3317  | 3452  | 3648  | 3811  | 3990  | 4254  | 4478  |
| Радий                         | 1038               | 1084  | 1151  | 1208  | 1271  | 1365  | 1446  | 1537  | 1676  | 1800  |
| Радон                         | 125,4              | 130,7 | 138,3 | 144,7 | 151,7 | 162,1 | 170,9 | 180,8 | 195,8 | 208,8 |

| Вещество                     | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Рений                        | 3972               | 4107  | 4299  | 4456  | 4626  | 4871  | 5074  | 5295  | 5619  | 5891  |
| Рений семифтористый [97]     | 226,5              | 234,6 | 246,1 | 255,6 | 265,8 | 280,7 | 293,1 | 306,7 | 326,7 | 343,7 |
| Рений шестифтористый [97]    | 209,6              | 216,2 | 225,7 | 233,4 | 241,6 | 253,5 | 253,3 | 273,9 | 289,2 | 302,0 |
| Рения окситетрахлорид [98]   | 307,1              | 319,4 | 337,4 | 352,5 | 368,9 | 393,1 | 413,6 | 436,4 | 470,8 | 500,5 |
| Рения семиокись              | 475,0              | 486,5 | 502,6 | 515,6 | 529,2 | 548,3 | 563,7 | 580,0 | 603,1 | 621,8 |
| Родий                        | 2764               | 2851  | 2975  | 3075  | 3183  | 3338  | 3465  | 3603  | 3802  | 3968  |
| Родий диметил [84]           | 227,7              | 236,6 | 249,4 | 260,0 | 271,6 | 288,6 | 303,0 | 318,8 | 342,5 | 362,9 |
| Родий                        | 399,2              | 414,3 | 436,1 | 454,1 | 473,8 | 502,5 | 526,6 | 553,2 | 592,7 | 626,6 |
| Родий бромистая              | 399,9              | 412,9 | 431,5 | 446,7 | 463,0 | 486,5 | 505,9 | 526,9 | 557,6 | 583,2 |
| Родий иодистая               | 420,6              | 434,5 | 454,3 | 470,5 | 487,9 | 513,0 | 533,7 | 556,3 | 589,1 | 616,7 |
| Родий хлористая              | 403,5              | 415,8 | 433,3 | 447,5 | 462,7 | 484,5 | 502,3 | 521,6 | 549,4 | 572,4 |
| Рубидий                      | 555,4              | 580,3 | 616,9 | 647,8 | 681,9 | 733,0 | 777,0 | 826,6 | 902,9 | 970,6 |
| Рубидий бромистый            | 1035               | 1074  | 1130  | 1176  | 1227  | 1300  | 1362  | 1430  | 1530  | 1616  |
| Рубидий иодистый             | 1002               | 1040  | 1094  | 1139  | 1188  | 1260  | 1320  | 1386  | 1485  | 1569  |
| Рубидий фтористый            | 1149               | 1185  | 1235  | 1277  | 1321  | 1384  | 1436  | 1491  | 1572  | 1640  |
| Рубидий хлористый            | 1045               | 1085  | 1142  | 1189  | 1241  | 1317  | 1380  | 1451  | 1555  | 1644  |
| Рутений                      | 3170               | 3267  | 3404  | 3516  | 3635  | 3805  | 3945  | 4096  | 4313  | 4494  |
| Рутения тетраоксид [99, 100] | 261,1              | 270,5 | 284,0 | 295,1 | 307,1 | 324,6 | 339,3 | 355,3 | 378,9 | 399,0 |
| Самарий                      | 1208               | 1252  | 1316  | 1369  | 1426  | 1510  | 1580  | 1657  | 1771  | 1868  |
| Самарий хлористый [78]       | 1460               | 1512  | 1587  | 1648  | 1714  | 1811  | 1891  | 1980  | 2109  | 2219  |
| Свинец                       | 1233               | 1284  | 1357  | 1418  | 1485  | 1584  | 1668  | 1761  | 1902  | 2024  |
| Свинец бромистый             | 770,3              | 798,0 | 837,9 | 870,9 | 906,5 | 958,3 | 1001  | 1049  | 1119  | 1178  |
| Свинец иодистый              | 735,4              | 762,1 | 800,6 | 832,4 | 866,8 | 917,0 | 958,9 | 1004  | 1072  | 1130  |
| Свинец сернистый             | 1105               | 1138  | 1185  | 1223  | 1263  | 1321  | 1368  | 1419  | 1492  | 1553  |
| Свинец фтористый             | —                  | 1061  | 1114  | 1157  | 1204  | 1272  | 1329  | 1391  | 1483  | 1561  |
| Свинец хлористый             | 805,2              | 833,5 | 874,2 | 907,7 | 943,9 | 996,4 | 1040  | 1087  | 1158  | 1217  |
| Свинца оксид                 | 1199               | 1238  | 1293  | 1338  | 1387  | 1456  | 1514  | 1576  | 1666  | 1742  |
| Селен                        | 612,9              | 634,5 | 665,5 | 691,1 | 718,7 | 758,8 | 792,3 | 828,8 | 882,5 | 928,1 |
| Селена диоксид               | 425,5              | 437,8 | 455,1 | 469,2 | 484,3 | 505,6 | 523,1 | 541,8 | 568,7 | 590,9 |
| Селена оксихлорид            | 304,4              | 314,2 | 328,2 | 339,7 | 352,0 | 369,7 | 384,3 | 400,1 | 423,1 | 442,3 |
| Селен четыреххлористый       | 343,2              | 352,4 | 365,3 | 375,7 | 386,8 | 402,4 | 415,1 | 428,7 | 448,0 | 463,8 |
| Селен шестифтористый         | 152,6              | 157,8 | 165,3 | 171,5 | 178,1 | 187,7 | 195,6 | 204,3 | 217,0 | 227,7 |
| Сера                         | 445,8              | 463,0 | 487,7 | 508,3 | 530,6 | 563,4 | 591,0 | 621,5 | 666,9 | 706,0 |
| Сера хлористая               | 260,3              | 270,0 | 284,1 | 295,8 | 308,5 | 327,1 | 342,7 | 359,8 | 385,3 | 407,2 |
| Сера шестифтористая          | 138,3              | 143,2 | 150,2 | 156,0 | 162,2 | 171,3 | 178,8 | 187,1 | 199,2 | 209,5 |
| Серебро                      | 1578               | 1635  | 1718  | 1786  | 1861  | 1969  | 2059  | 2158  | 2305  | 2430  |
| Серебро иодистое             | 1071               | 1115  | 1179  | 1233  | 1292  | 1379  | 1453  | 1535  | 1660  | 1768  |
| Серебро хлористое            | 1164               | 1208  | 1272  | 1325  | 1383  | 1467  | 1538  | 1616  | 1732  | 1832  |
| Серная кислота               | 412,6              | 426,0 | 445,1 | 460,8 | 477,6 | 501,8 | 521,8 | 543,5 | 575,0 | 601,4 |
| Сернистый ангидрид           | 172,7              | 178,7 | 187,4 | 194,5 | 202,2 | 213,3 | 222,6 | 232,8 | 247,7 | 260,3 |
| Серный ангидрид (α)          | 230,8              | 237,1 | 246,1 | 253,4 | 261,1 | 272,1 | 281,0 | 290,5 | 304,1 | 315,3 |
| Серный ангидрид (β)          | 236,3              | 242,4 | 251,0 | 258,0 | 265,3 | 275,7 | 284,1 | 293,0 | 305,8 | 316,1 |
| Серный ангидрид (γ)          | 255,3              | 260,9 | 268,7 | 274,9 | 281,4 | 290,5 | 297,7 | 305,4 | 316,1 | 324,7 |
| Сероводород                  | 136,0              | 141,0 | 148,3 | 154,3 | 160,8 | 170,4 | 178,4 | 187,2 | 200,2 | 211,3 |
| Силан [3, 101]               | 96,2               | 100,2 | 106,0 | 110,9 | 116,2 | 124,1 | 130,9 | 138,3 | 149,7 | 159,6 |
| Синильная кислота            | 197,8              | 204,5 | 214,1 | 222,0 | 230,6 | 242,9 | 253,1 | 264,2 | 280,5 | 294,3 |
| Стибин [102]                 | —                  | —     | 169,4 | 177,1 | 185,6 | 198,2 | 208,9 | 220,8 | 238,9 | 254,6 |
| Стронций                     | 979,9              | 1020  | 1080  | 1130  | 1185  | 1266  | 1335  | 1412  | 1529  | 1631  |
| Стронций хлористый [63]      | 1553               | 1610  | 1693  | 1761  | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| Стронция оксид               | 2314               | 2370  | 2449  | 2512  | 2578  | —     | —     | —     | —     | —     |
| Сульфурил хлористый          | —                  | 221,7 | 233,8 | 244,0 | 255,0 | 271,1 | 284,8 | 299,9 | 322,6 | 342,1 |
| Сурьма                       | 999,1              | 1051  | 1128  | 1195  | 1270  | 1385  | 1486  | 1604  | 1792  | 1967  |
| Сурьма пятифтористая         | 271,9              | 281,7 | 295,7 | 307,3 | 319,8 | 338,0 | 353,2 | 369,9 | 394,4 | 415,3 |
| Сурьма пятихлористая         | 291,3              | 301,8 | 317,0 | 329,6 | 343,1 | 362,9 | 379,5 | —     | —     | —     |
| Сурьма трехбромистая         | 362,2              | 374,2 | 393,2 | 408,3 | 424,6 | 448,2 | 467,9 | 489,5 | 521,1 | 547,9 |
| Сурьма трехиодистая          | 429,4              | 445,5 | 468,9 | 488,2 | 509,2 | 539,9 | 565,7 | 594,1 | 636,3 | 672,5 |
| Сурьма треххлористая         | 312,4              | 324,0 | 340,8 | 354,6 | 369,6 | 391,5 | 409,9 | 430,1 | 460,1 | 485,7 |
| Сурьмы триоксид              | 778,0              | 821,1 | 886,1 | 942,5 | 1006  | 1105  | 1195  | 1300  | 1470  | 1633  |
| Таллий                       | 1086               | 1128  | 1190  | 1241  | 1297  | 1379  | 1448  | 1525  | 1640  | 1739  |
| Таллий бромистый             | —                  | 711,4 | 749,6 | 781,4 | 816,0 | 866,7 | 909,4 | 956,6 | 1027  | 1087  |

| Вещество                                  | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                           | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Таллий иодистый                           | 699,1              | 725,2 | 762,8 | 794,0 | 827,7 | 877,1 | 918,5 | 964,1 | 1031  | 1089  |
| Таллий пятифтористый                      | 327,7              | 339,5 | 356,5 | 370,5 | 385,7 | 407,7 | 426,2 | 446,4 | 476,3 | 501,6 |
| Таллий сернистый [89]                     | 926,6              | 963,4 | 1016  | 1061  | 1110  | 1181  | 1242  | 1309  | 1409  | 1496  |
| Таллий хлористый                          | —                  | 707,4 | 744,9 | 776,1 | 809,9 | 859,5 | 901,2 | 947,2 | 1015  | 1074  |
| Тантал                                    | 3925               | 4044  | 4213  | 4350  | 4496  | 4706  | 4878  | 5063  | 5331  | 5552  |
| Тантал пятибромистый [90]                 | 430,2              | 442,8 | 460,7 | 475,2 | 490,7 | 512,8 | 530,8 | 550,2 | 578,1 | 601,2 |
| Тантал пятифтористый                      | —                  | —     | —     | —     | —     | 367,5 | 392,0 | 419,8 | 463,4 | 502,9 |
| Тантал пятихлористый [91, 103]            | 341,8              | 354,0 | 371,6 | 386,2 | 401,9 | 424,7 | 443,8 | 464,7 | 495,5 | 521,7 |
| Теллур [3, 104—106]                       | 775,0              | 806,1 | 851,4 | 889,1 | 930,4 | 991,2 | 1042  | 1099  | 1185  | 1260  |
| Теллур четыреххлористый                   | —                  | —     | 479,6 | 497,5 | 516,9 | 544,8 | 568,1 | 593,4 | 630,6 | 662,0 |
| Теллур шестифтористый                     | 159,1              | 164,4 | 172,0 | 178,2 | 184,8 | 194,4 | 202,4 | 211,0 | 223,6 | 234,2 |
| Тербий [77]                               | 2350               | 2430  | 2520  | 2615  | 2730  | 2850  | 3060  | 3200  | 3410  | 3660  |
| Тетраборан                                | 179,1              | 186,2 | 196,5 | 205,1 | 214,5 | 228,3 | 239,9 | 252,8 | 272,2 | 288,9 |
| Тетрагидропентаборан                      | 219,6              | 227,7 | 239,4 | 249,0 | 259,5 | 274,8 | 287,6 | 301,6 | 322,4 | 340,2 |
| Тетраметилгерманий                        | 195,9              | 203,6 | 214,8 | 224,1 | 234,3 | 249,2 | 261,9 | 275,9 | 296,8 | 314,9 |
| Тетрасилан                                | 241,2              | 250,0 | 262,7 | 273,1 | 284,5 | 301,0 | 314,8 | 330,0 | 352,5 | 371,6 |
| Тетрафторгидразин                         | 115,1              | 120,2 | 127,6 | 133,9 | 140,8 | 151,1 | 160,0 | 169,9 | 185,2 | 198,7 |
| Технеций                                  | 3365               | —     | —     | 3750  | —     | —     | 4360  | —     | 4699  | 4967  |
| Технеций шестифтористый [107]             | 221,0              | 228,2 | 238,5 | 246,9 | 255,9 | 268,8 | 279,6 | 291,2 | 308,1 | 322,3 |
| Технеция гептаоксид [108]                 | 389,6              | 403,1 | 422,4 | 438,3 | 455,5 | 480,3 | 501,0 | 523,5 | 556,5 | 584,5 |
| Тионилбромид                              | 262,5              | 272,4 | 286,8 | 298,7 | 311,7 | 330,6 | 346,6 | 364,1 | 390,3 | 412,7 |
| Тионилфторид [109]                        | 146,7              | 152,1 | 159,9 | 166,3 | 173,3 | 183,4 | 192,0 | 201,3 | 215,2 | 227,0 |
| Тионилхлорид                              | 212,8              | 221,6 | 234,3 | 244,9 | 256,5 | 273,6 | 288,2 | 304,4 | 328,9 | 350,2 |
| Титан                                     | 2450               | 2524  | 2630  | 2716  | 2807  | 2939  | 3046  | 3162  | 3330  | 3469  |
| Титан четыреххлористый [110]              | 255,4              | 265,3 | 279,5 | 291,4 | 304,3 | 323,1 | 339,1 | 356,6 | 382,9 | 405,4 |
| Торий                                     | 3010               | —     | —     | 3340  | —     | —     | 3855  | —     | 4308  | 4470  |
| Трибромсилан                              | 237,7              | 247,1 | 260,7 | 272,1 | 284,5 | 302,7 | 318,1 | 335,2 | 360,8 | 382,9 |
| Трибромфторсилан                          | 222,4              | 231,0 | 243,6 | 254,0 | 265,3 | 282,0 | 296,1 | 311,6 | 334,8 | 354,9 |
| Тригерман                                 | 232,1              | 241,6 | 255,5 | 267,1 | 279,8 | 298,5 | 314,5 | 332,2 | 359,1 | 382,4 |
| Трисилан                                  | 200,0              | 208,1 | 219,7 | 229,5 | 240,1 | 255,8 | 269,1 | 283,8 | 306,0 | 325,2 |
| Трифторсилан                              | 118,7              | 122,7 | 128,6 | 133,3 | 138,5 | 146,0 | 152,2 | 158,9 | 168,8 | 177,2 |
| Трихлоргерман                             | 227,3              | 235,4 | 247,0 | 256,5 | 266,9 | 281,8 | 294,3 | 308,0 | 328,1 | —     |
| Трихлорсилан                              | 188,7              | 196,2 | 206,9 | 215,8 | 225,6 | 239,9 | 252,0 | 265,4 | 285,5 | 302,8 |
| Углерод (графит)                          | 3353               | 3480  | 3663  | 3814  | 3978  | 4219  | 4421  | 4644  | 4975  | 5258  |
| Углерода диоксид                          | 135,8              | 140,1 | 146,1 | 151,0 | 156,3 | 163,8 | 170,0 | 176,7 | 186,4 | 194,5 |
| Углерода недоокись [111]                  | 173,7              | 180,5 | 190,4 | 198,5 | 207,5 | 220,6 | 231,6 | 243,8 | 262,1 | 277,9 |
| Углерода оксид                            | 49,8               | 51,8  | 54,7  | 57,0  | 59,7  | 63,5  | 66,7  | 70,4  | 75,8  | 80,4  |
| Уран                                      | 2691               | 2788  | 2929  | 3045  | 3171  | 3354  | 3508  | 3676  | 3924  | 4136  |
| Уран четырехфтористый [112]               | 1202               | 1239  | 1292  | 1335  | 1381  | 1447  | 1502  | 1560  | 1645  | 1716  |
| Уран шестифтористый                       | 239,3              | 246,1 | 255,6 | 263,2 | 271,4 | 283,0 | 292,5 | 302,6 | 317,1 | 329,0 |
| Фосфин                                    | —                  | —     | —     | —     | 133,5 | 142,9 | 150,9 | 159,9 | 173,5 | 185,5 |
| Фосфоний бромистый                        | 226,4              | 232,8 | 241,8 | 249,0 | 256,8 | 267,7 | 276,6 | 286,2 | 299,9 | 311,1 |
| Фосфоний иодистый                         | 244,7              | 251,5 | 261,1 | 268,9 | 277,1 | 288,8 | 298,4 | 308,5 | 323,1 | 335,1 |
| Фосфоний хлористый                        | 179,4              | 184,3 | 191,3 | 197,0 | 203,0 | 211,5 | 218,5 | 225,9 | 236,5 | 245,2 |
| Фосфор желтый                             | 341,3              | 354,6 | 373,8 | 389,9 | 407,3 | 432,9 | 454,5 | 478,4 | 514,2 | 545,0 |
| Фосфор красный                            | 503,3              | 517,4 | 537,1 | 553,1 | 570,1 | 594,2 | 613,9 | 634,8 | 664,9 | 689,6 |
| Фосфора оксихлорид                        | —                  | —     | 258,5 | 269,6 | 281,6 | 299,4 | 314,3 | 330,9 | 355,6 | 376,9 |
| Фосфора пентаоксид (метастабильная форма) | 456,6              | 469,6 | 487,9 | 502,8 | 518,6 | 541,0 | 559,4 | 579,0 | 607,2 | 630,4 |
| Фосфора пентаоксид (стабильная форма)     | 650,1              | 666,3 | 688,8 | 707,0 | 726,1 | 753,0 | 774,7 | 797,7 | 830,3 | 856,8 |
| Фосфора тиобромид                         | 318,6              | 328,0 | 341,4 | 352,3 | 363,9 | 380,4 | 393,9 | 408,5 | 429,4 | 446,7 |
| Фосфора тиохлорид                         | 249,9              | 259,5 | 273,2 | 284,7 | 297,2 | 315,4 | 330,7 | 347,7 | 372,9 | 394,6 |
| Фосфора триоксид                          | —                  | 291,8 | 307,5 | 320,6 | 334,8 | 355,6 | 373,2 | 392,6 | 421,6 | 446,5 |
| Фосфор пятихлористый                      | 323,0              | 331,3 | 343,0 | 352,4 | 362,3 | 376,4 | 387,7 | 399,8 | 416,9 | 430,9 |
| Фосфор трехбромистый                      | 275,4              | 286,3 | 302,3 | 315,6 | 330,1 | 351,4 | 369,5 | 389,5 | 419,6 | 445,7 |
| Фосфор треххлористый                      | 217,0              | 225,5 | 237,7 | 247,8 | 258,9 | 275,1 | 288,8 | 303,9 | 326,5 | 345,9 |
| Франций                                   | 486,8              | 509,4 | 542,8 | 571,1 | 602,6 | 649,8 | 690,8 | 737,4 | 809,4 | 874,0 |

| Вещество                    | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Фтор                        | 49,7               | 51,9  | 55,1  | 57,7  | 60,7  | 65,1  | 68,8  | 73,0  | 79,4  | 85,1  |
| Фтора оксид                 | 76,5               | 79,7  | 84,5  | 88,5  | 92,9  | 99,4  | 105,0 | 111,2 | 120,7 | 129,0 |
| Фторсилан                   | 116,6              | 120,5 | 126,2 | 130,8 | 135,7 | 142,9 | 148,8 | 155,2 | 164,7 | 172,6 |
| Фтортрихлорсилан            | 176,5              | 183,4 | 193,5 | 201,8 | 210,9 | 224,3 | 235,6 | 248,1 | 266,8 | 282,9 |
| Хлор                        | 149,9              | 155,6 | 163,9 | 170,7 | 178,1 | 189,0 | 198,1 | 208,2 | 223,2 | 236,1 |
| Хлора диоксид               | —                  | —     | 201,7 | 209,5 | 217,9 | 230,1 | 240,3 | 251,4 | 267,9 | 281,8 |
| Хлора оксид                 | 171,8              | 178,5 | 188,3 | 196,3 | 205,2 | 218,1 | 229,0 | 241,1 | 259,2 | 274,7 |
| Хлора гексаоксид            | 276,0              | 285,6 | 299,2 | 310,5 | 322,6 | 340,2 | 354,9 | 370,8 | 394,2 | 414,0 |
| Хлорный ангидрид            | 224,5              | 232,9 | 245,2 | 255,3 | 266,3 | 282,5 | 296,0 | 310,9 | 333,1 | 352,2 |
| Хлорсилан                   | 151,7              | 157,6 | 166,0 | 173,0 | 180,6 | 191,7 | 201,1 | 211,4 | 226,8 | 240,1 |
| Хлорсульфоновая кислота     | 300,8              | 309,8 | 322,6 | 333,0 | 344,1 | 359,9 | 372,9 | 386,8 | 407,0 | 423,6 |
| Хлортрифторсилан            | 126,0              | 131,0 | 138,1 | 144,1 | 150,6 | 160,1 | 168,2 | 177,1 | 190,4 | 201,9 |
| Хлор трехфтористый          | —                  | 178,5 | 188,9 | 197,5 | 207,0 | 221,1 | 233,1 | 246,4 | 266,5 | 284,1 |
| Хлор фтористый              | —                  | 122,2 | 127,7 | 132,2 | 137,0 | 144,0 | 149,8 | 156,0 | 165,1 | 172,7 |
| Хром                        | 1939               | 2002  | 2093  | 2167  | 2247  | 2362  | 2457  | 2559  | 2709  | 2835  |
| Хрома карбонил              | 305,6              | 314,5 | 327,0 | 337,1 | 347,8 | 363,2 | 375,7 | 389,1 | 408,4 | 424,3 |
| Хромил хлористый            | 249,4              | 258,5 | 271,7 | 282,7 | 294,5 | 311,7 | 326,2 | 342,1 | 365,5 | 385,6 |
| Цезий                       | 532,1              | 556,5 | 592,3 | 622,7 | 656,3 | 706,8 | 750,4 | 799,8 | 876,0 | 944,1 |
| Цезий бромистый             | 1003               | 1041  | 1095  | 1140  | 1189  | 1260  | 1320  | 1386  | 1484  | 1567  |
| Цезий иодистый              | 993,5              | 1030  | 1083  | 1127  | 1175  | 1245  | 1304  | 1368  | 1464  | 1546  |
| Цезий фтористый             | 966,5              | 1003  | 1055  | 1099  | 1146  | 1216  | 1274  | 1338  | 1433  | 1515  |
| Цезий хлористый             | 1000               | 1038  | 1092  | 1137  | 1186  | 1257  | 1317  | 1383  | 1482  | 1566  |
| Церий                       | 2070               | 2152  | 2270  | 2369  | 2477  | 2636  | 2770  | 2918  | 3141  | 3334  |
| Цинк                        | 750,4              | 778,9 | 820,2 | 854,4 | 891,6 | 946,1 | 991,9 | 1042  | 1117  | 1182  |
| Цинка диметил [84]          | 201,7              | 209,2 | 220,0 | 229,0 | 238,7 | 252,8 | 264,7 | 277,8 | 297,2 | 313,8 |
| Цинк бромистый [113]        | 636,5              | 657,2 | 686,7 | 710,8 | 736,7 | 773,9 | 804,6 | 838,0 | 886,5 | 927,1 |
| Цинк сернистый [114]        | 1313               | 1352  | 1406  | 1451  | 1498  | 1566  | 1621  | 1680  | —     | —     |
| Цинк фтористый              | 1475               | 1516  | 1573  | 1618  | 1667  | 1736  | 1792  | 1852  | 1938  | 2008  |
| Цинк хлористый [3, 83, 113] | *684,3             | 705,6 | 735,9 | 760,5 | 786,9 | 824,7 | 855,8 | 889,3 | 937,9 | 978,3 |
| Цирконий                    | 3190               | 3292  | 3436  | 3554  | 3680  | 3861  | 4011  | 4172  | 4407  | 4603  |
| Цирконий четырехбромистый   | 475,7              | 487,6 | 504,3 | 517,7 | 531,8 | 551,8 | 567,8 | 584,9 | 609,1 | 628,7 |
| Цирконий четырехиодистый    | 531,5              | 544,8 | 563,5 | 578,5 | 594,3 | 616,6 | 634,6 | 653,6 | 680,7 | 702,7 |
| Цирконий четыреххлористый   | 454,2              | 466,0 | 482,6 | 495,9 | 510,0 | 529,9 | 546,0 | 563,1 | 587,5 | 607,4 |

Таблица 11.4. Давление пара элементов и некоторых простейших соединений (выше  $10^5$  Па) при различной температуре [115]

| $T, K$     | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $T, K$        | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $T, K$ | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $T, K$ | $p, 10^5 \text{ Па}$ |
|------------|----------------------|---------------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|
| Азот $N_2$ |                      | 108           | 13,03                | 270    | 3,819                | 90     | 1,337                |
|            |                      | 110           | 14,67                | 280    | 5,518                | 92     | 1,622                |
| 78         | 1,093                | 112           | 16,45                | 290    | 7,753                | 94     | 1,952                |
| 80         | 1,369                | 114           | 18,36                | 300    | 10,624               | 96     | 2,329                |
| 82         | 1,694                | 116           | 20,47                | 310    | 14,249               | 98     | 2,758                |
| 84         | 2,074                | 118           | 22,72                | 320    | 18,66                | 100    | 3,243                |
| 86         | 2,515                | 120           | 25,15                | 330    | 24,22                | 102    | 3,787                |
| 88         | 3,022                | 122           | 27,77                | 340    | 30,82                | 104    | 4,397                |
| 90         | 3,600                | 124           | 30,57                | 360    | 38,70                | 106    | 5,074                |
| 92         | 4,256                | 126           | 33,57                | 370    | 58,91                | 108    | 5,825                |
| 94         | 4,995                | 126,25        | 33,96                | 380    | 71,54                | 110    | 6,652                |
| 96         | 5,824                | Аммиак $NH_3$ |                      | 390    | 86,06                | 112    | 7,562                |
| 98         | 6,748                |               |                      | 400    | 102,8                | 114    | 8,557                |
| 100        | 7,775                | Аргон $Ar$    |                      | 405,6  | 113,0                | 116    | 9,643                |
| 102        | 8,910                |               |                      |        |                      | 118    | 10,82                |
| 104        | 10,16                | 240           | 1,0258               |        |                      | 120    | 12,11                |
| 106        | 11,53                | 250           | 1,6536               | 88     | 1,091                | 122    | 13,49                |
|            |                      | 260           | 2,559                |        |                      | 124    | 14,99                |



| $T, K$                                   | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $T, K$                                  | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $T, K$         | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $T, K$    | $p, 10^5 \text{ Па}$ |
|------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------|----------------------|----------------|----------------------|-----------|----------------------|
| 126                                      | 16,60                | 29                                      | 6,848                | 1450           | 16,1                 | 136       | 3,080                |
| 128                                      | 18,33                | 30                                      | 8,077                | 1500           | 20,0                 | 138       | 3,465                |
| 130                                      | 20,20                | 30,5                                    | 8,747                | 1550           | 24,6                 | 140       | 3,884                |
| 132                                      | 22,19                | 31                                      | 9,455                | 1600           | 29,8                 | 142       | 4,339                |
| 134                                      | 24,32                | 31,5                                    | 10,20                | 1650           | 35,6                 | 144       | 4,832                |
| 136                                      | 26,31                | 32                                      | 11,00                | 1700           | 42,0                 | 146       | 5,364                |
| 138                                      | 29,04                | 32,5                                    | 11,84                | 1750           | 49,2                 | 148       | 5,938                |
| 140                                      | 31,64                | 33                                      | 12,73                | 1800           | 57,0                 | 150       | 6,556                |
| 142                                      | 34,41                | 33,23                                   | 13,16                | 1850           | 65,4                 | 152       | 7,218                |
| 144                                      | 37,36                | Вольфрам шестифтористый<br>$WF_6$ [116] |                      | 1900           | 74,5                 | 154       | 7,928                |
| 146                                      | 40,50                |                                         |                      | 1950           | 84,3                 | 156       | 8,687                |
| 148                                      | 43,83                |                                         |                      | 2000           | 94,7                 | 158       | 9,497                |
| 150                                      | 47,39                |                                         |                      | 2050           | 105,6                | 160       | 10,36                |
|                                          |                      |                                         |                      | 2100           | 117,2                |           |                      |
| Вода тяжелая $D_2O$<br>( $t, ^\circ C$ ) |                      | 304,2                                   | 1,73                 | 2150           | 129,4                | Ксенон Xe |                      |
|                                          |                      | 314,2                                   | 2,39                 | 2170           | 134,4                |           |                      |
|                                          |                      | 324,2                                   | 3,18                 |                |                      |           |                      |
|                                          |                      | 334,1                                   | 4,21                 |                |                      |           |                      |
|                                          |                      | 344,1                                   | 5,48                 |                |                      |           |                      |
| 110                                      | 1,3728               | 354,1                                   | 7,02                 | Кислород $O_2$ |                      | 166       | 1,071                |
| 120                                      | 1,9134               | 364,0                                   | 8,80                 |                |                      | 168       | 1,199                |
| 130                                      | 2,6170               | 374,0                                   | 11,01                |                |                      | 170       | 1,337                |
| 140                                      | 3,518                | 383,3                                   | 13,53                |                |                      | 172       | 1,488                |
| 150                                      | 4,653                | 393,8                                   | 16,57                |                |                      | 174       | 1,651                |
| 160                                      | 6,066                | 403,7                                   | 19,96                | 94             | 1,486                | 176       | 1,827                |
| 170                                      | 7,802                | 413,7                                   | 23,88                | 96             | 1,793                | 178       | 2,017                |
| 180                                      | 9,911                | 423,6                                   | 28,40                | 98             | 2,145                | 180       | 2,222                |
| 190                                      | 12,445               | 433,5                                   | 33,50                | 100            | 2,546                | 182       | 2,442                |
| 200                                      | 15,462               | 443,5                                   | 39,35                | 102            | 3,002                | 184       | 2,678                |
| 210                                      | 19,028               |                                         |                      | 104            | 3,515                | 186       | 2,930                |
| 220                                      | 23,194               | Гелий $^4He$ [117]                      |                      | 106            | 4,090                | 188       | 3,200                |
| 230                                      | 28,031               |                                         |                      | 108            | 4,731                | 190       | 3,487                |
| 240                                      | 33,606               |                                         |                      | 110            | 5,443                | 192       | 3,794                |
| 250                                      | 39,993               |                                         |                      | 112            | 6,229                | 194       | 4,119                |
| 260                                      | 47,280               |                                         |                      | 114            | 7,095                | 196       | 4,465                |
| 270                                      | 55,527               | 4,25                                    | 1,0401               | 116            | 8,045                | 198       | 4,832                |
| 280                                      | 64,834               | 4,30                                    | 1,0894               | 118            | 9,083                | 200       | 5,220                |
| 290                                      | 75,288               | 4,35                                    | 1,1402               | 120            | 10,21                | 202       | 5,631                |
| 300                                      | 86,968               | 4,40                                    | 1,1927               | 122            | 11,44                | 204       | 6,064                |
| 305                                      | 93,323               | 4,45                                    | 1,2468               | 124            | 12,78                | 206       | 6,522                |
| 310                                      | 100,01               | 4,50                                    | 1,3026               | 126            | 14,22                | 208       | 7,004                |
| 315                                      | 107,07               | 4,55                                    | 1,3601               | 128            | 15,77                | 210       | 7,511                |
| 320                                      | 114,54               | 4,60                                    | 1,4193               | 130            | 17,44                | 212       | 8,045                |
| 325                                      | 122,38               | 4,65                                    | 1,4803               | 132            | 19,24                | 214       | 8,605                |
| 330                                      | 130,65               | 4,70                                    | 1,5431               | 134            | 21,17                | 216       | 9,194                |
| 335                                      | 139,37               | 4,75                                    | 1,6078               | 136            | 23,24                | 218       | 9,810                |
| 340                                      | 148,54               | 4,80                                    | 1,6743               | 138            | 25,45                | 220       | 10,46                |
| 345                                      | 158,20               | 4,85                                    | 1,7427               | 140            | 27,82                | 222       | 11,13                |
| 350                                      | 168,35               | 4,90                                    | 1,8131               | 142            | 30,34                | 224       | 11,84                |
| 355                                      | 178,98               | 4,95                                    | 1,8855               | 144            | 33,04                | Литий Li  |                      |
| 360                                      | 190,16               | 5,00                                    | 1,9600               | 146            | 35,91                |           |                      |
| 365                                      | 202,12               | 5,05                                    | 2,0367               | 148            | 38,97                |           |                      |
| 370                                      | 214,68               | 5,10                                    | 2,1158               | 150            | 42,23                |           |                      |
| 371                                      | 217,22               | 5,15                                    | 2,1976               | 152            | 45,69                |           |                      |
|                                          |                      | 5,19                                    | 2,2654               | 154,77         | 50,87                | 1650      | 1,283                |
| Водород $H_2$                            |                      | Калий K                                 |                      | Криптон Kr     |                      | 1700      | 1,771                |
|                                          |                      |                                         |                      |                |                      | 1750      | 2,399                |
|                                          |                      |                                         |                      |                |                      | 1800      | 3,191                |
|                                          |                      |                                         |                      |                |                      | 1850      | 4,179                |
|                                          |                      |                                         |                      |                |                      | 1900      | 5,397                |
| 21                                       | 1,209                | 1050                                    | 1,217                | 120            | 1,031                | 1950      | 6,871                |
| 22                                       | 1,584                | 1100                                    | 1,864                | 122            | 1,202                | 2000      | 8,639                |
| 23                                       | 2,036                | 1150                                    | 2,745                | 124            | 1,395                | 2100      | 12,4                 |
| 24                                       | 2,574                | 1200                                    | 3,913                | 126            | 1,610                | 2200      | 18,3                 |
| 25                                       | 3,206                | 1250                                    | 5,415                | 128            | 1,849                | 2300      | 26,1                 |
| 26                                       | 3,942                | 1300                                    | 7,304                | 130            | 2,114                | 2400      | 33,1                 |
| 27                                       | 4,789                | 1350                                    | 9,628                | 132            | 2,406                | 2500      | 49,1                 |
| 28                                       | 5,755                | 1400                                    | 12,44                | 134            | 2,728                | 2600      | 66,1                 |

| T, К                                              | p, 10 <sup>5</sup> Па | T, К | p, 10 <sup>5</sup> Па | T, К                                          | p, 10 <sup>5</sup> Па | T, К                                         | p, 10 <sup>5</sup> Па |       |       |
|---------------------------------------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------|-------|
| 2700                                              | 87,1                  | 32   | 3,5526                | Сернистый ангидрид SO <sub>2</sub><br>(t, °C) |                       | 302                                          | 70,246                |       |       |
| 2800                                              | 113,7                 | 33   | 4,3860                |                                               |                       | 303                                          | 71,858                |       |       |
| 2900                                              | 146,5                 | 34   | 5,3518                |                                               |                       | 304,19                                       | 73,815                |       |       |
| 3000                                              | 186,6                 | 35   | 6,4618                | -10                                           | 1,01                  | Углерода оксид CO (t, °C)                    |                       |       |       |
| 3100                                              | 235,4                 | 36   | 7,7282                | 10                                            | 2,23                  |                                              |                       |       |       |
| 3200                                              | 295,2                 | 37   | 9,1637                | 20                                            | 3,30                  |                                              |                       |       |       |
| 3300                                              | 365,8                 | 38   | 10,7820               | 30                                            | 4,62                  |                                              |                       |       |       |
| 3400                                              | 449,9                 | 39   | 12,597                | 40                                            | 6,30                  |                                              |                       |       |       |
| 3500                                              | 550,5                 | 40   | 14,625                | 50                                            | 8,48                  |                                              |                       |       |       |
| 3600                                              | 668,2                 | 41   | 16,882                | 60                                            | 11,15                 |                                              |                       |       |       |
| 3700                                              | 806,7                 | 42   | 19,387                | 70                                            | 14,26                 |                                              |                       |       |       |
| 3800                                              | 968,3                 | 43   | 22,157                | 80                                            | 18,02                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       | 44   | 25,217                | 90                                            | 22,49                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       | 44,4 | 26,54                 | 100                                           | 27,77                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 110                                           | 33,96                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 120                                           | 41,12                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 130                                           | 49,40                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 140                                           | 58,91                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 150                                           | 69,74                 |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 157,5                                         | 78,82                 |                                              |                       |       |       |
| Молибден шестифтористый<br>MoF <sub>6</sub> [118] |                       |      |                       | Углерода диоксид CO <sub>2</sub>              |                       | -155,94                                      | 16,21                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -153,65                                      | 18,23                 |       |       |
| 323,2                                             | 1,73                  | 360  | 1,0772                | 216,55                                        | 5,18                  | -151,70                                      | 20,26                 |       |       |
| 333,2                                             | 2,36                  | 380  | 1,5207                | 220                                           | 6,00                  | -147,18                                      | 25,32                 |       |       |
| 343,2                                             | 3,15                  | 400  | 2,1024                | 225                                           | 7,34                  | -143,30                                      | 30,39                 |       |       |
| 353,2                                             | 4,15                  | 420  | 2,852                 | 230                                           | 8,91                  | -140,23                                      | 34,98                 |       |       |
| 363,2                                             | 5,33                  | 440  | 3,801                 | 235                                           | 10,75                 |                                              |                       |       |       |
| 373,2                                             | 6,79                  | 460  | 4,986                 | 240                                           | 12,82                 | Уран шестифтористый UF <sub>6</sub><br>[119] |                       |       |       |
| 383,2                                             | 8,52                  | 480  | 6,446                 | 245                                           | 15,18                 |                                              |                       |       |       |
| 393,2                                             | 10,50                 | 500  | 8,222                 | 250                                           | 17,87                 |                                              |                       | 364,0 | 3,33  |
| 403,2                                             | 12,90                 | 520  | 10,358                | 255                                           | 20,85                 |                                              |                       | 374,0 | 4,28  |
| 413,2                                             | 15,63                 | 540  | 12,901                | 260                                           | 24,21                 |                                              |                       | 383,8 | 5,44  |
| 423,2                                             | 18,72                 | 560  | 15,899                | 265                                           | 27,87                 |                                              |                       | 393,8 | 6,84  |
| 433,2                                             | 22,33                 | 580  | 19,403                | 270                                           | 32,03                 |                                              |                       | 403,7 | 8,47  |
| 443,2                                             | 26,25                 | 600  | 23,46                 | 273,15                                        | 34,839                |                                              |                       | 413,7 | 10,38 |
| 453,2                                             | 30,70                 | 620  | 28,14                 | 274                                           | 35,633                |                                              |                       | 423,6 | 12,59 |
| 463,2                                             | 35,90                 | 640  | 33,47                 | 275                                           | 36,576                |                                              |                       | 433,5 | 15,15 |
| 473,2                                             | 41,75                 | 660  | 39,53                 | 276                                           | 37,543                |                                              |                       | 443,5 | 18,01 |
| 483,2                                             | 48,55                 | 680  | 46,36                 | 277                                           | 38,521                |                                              |                       | 453,4 | 21,28 |
|                                                   |                       | 700  | 54,03                 | 278                                           | 39,520                | 463,3                                        | 24,98                 |       |       |
|                                                   |                       | 720  | 62,59                 | 279                                           | 40,547                | 473,2                                        | 29,13                 |       |       |
|                                                   |                       | 740  | 72,10                 | 280                                           | 41,588                | 483,2                                        | 33,93                 |       |       |
|                                                   |                       | 760  | 82,60                 | 281                                           | 42,654                | 493,0                                        | 39,08                 |       |       |
|                                                   |                       | 780  | 94,17                 | 282                                           | 43,732                | 502,9                                        | 45,08                 |       |       |
|                                                   |                       | 800  | 106,85                | 283                                           | 44,831                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 284                                           | 45,956                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 285                                           | 47,096                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 286                                           | 48,261                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 287                                           | 49,450                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 288                                           | 50,666                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 289                                           | 51,895                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 290                                           | 53,148                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 291                                           | 54,432                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 292                                           | 55,732                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 293                                           | 57,066                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 294                                           | 58,421                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 295                                           | 59,802                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 296                                           | 61,205                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 297                                           | 62,639                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 298                                           | 64,098                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 299                                           | 65,598                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 300                                           | 67,115                |                                              |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       | 301                                           | 68,661                |                                              |                       |       |       |
| Натрий Na                                         |                       |      |                       | Углерода диоксид CO <sub>2</sub>              |                       | -140,23                                      | 34,98                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -135,94                                      | 16,21                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -131,65                                      | 18,23                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -127,36                                      | 20,26                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -123,07                                      | 25,32                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -118,78                                      | 30,39                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -114,49                                      | 34,98                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -110,20                                      |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -105,91                                      |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -101,62                                      |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -97,33                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -93,04                                       |                       |       |       |
| Рубидий Rb                                        |                       |      |                       | Углерода диоксид CO <sub>2</sub>              |                       | -105,91                                      | 16,21                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -101,62                                      | 18,23                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -97,33                                       | 20,26                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -93,04                                       | 25,32                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -88,75                                       | 30,39                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -84,46                                       | 34,98                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -80,17                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -75,88                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -71,59                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -67,30                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -63,01                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -58,72                                       |                       |       |       |
| Сера шестифтористая<br>SF <sub>6</sub> [118]      |                       |      |                       | Углерода диоксид CO <sub>2</sub>              |                       | -101,62                                      | 18,23                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -97,33                                       | 20,26                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -93,04                                       | 25,32                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -88,75                                       | 30,39                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -84,46                                       | 34,98                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -80,17                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -75,88                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -71,59                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -67,30                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -63,01                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -58,72                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -54,43                                       |                       |       |       |
| Неон Ne                                           |                       |      |                       | Углерода диоксид CO <sub>2</sub>              |                       | -101,62                                      | 18,23                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -97,33                                       | 20,26                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -93,04                                       | 25,32                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -88,75                                       | 30,39                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -84,46                                       | 34,98                 |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -80,17                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -75,88                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -71,59                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -67,30                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -63,01                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -58,72                                       |                       |       |       |
|                                                   |                       |      |                       |                                               |                       | -54,43                                       |                       |       |       |

| Т, К                         | ρ, 10 <sup>5</sup> Па | Т, К   | ρ, 10 <sup>5</sup> Па | Т, К     | ρ, 10 <sup>5</sup> Па | Т, К | ρ, 10 <sup>5</sup> Па |
|------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|----------|-----------------------|------|-----------------------|
| 135,0                        | 35,57                 | 32,22  | 9,279                 | Цезий Cs |                       | 1500 | 27,6                  |
| 137,5                        | 39,93                 | 43,33  | 12,207                |          |                       | 1550 | 33,0                  |
| 140,0                        | 44,69                 | 54,44  | 15,752                |          |                       | 1600 | 38,9                  |
| 142,5                        | 49,87                 | 65,56  | 19,997                |          |                       | 1650 | 45,4                  |
| 144,0                        | 53,25                 | 76,67  | 25,011                |          |                       | 1700 | 52,4                  |
| Хлор Cl <sub>2</sub> (t, °C) |                       | 87,78  | 30,886                |          |                       | 1750 | 60,0                  |
|                              |                       | 98,89  | 37,694                |          |                       | 1800 | 68,2                  |
|                              |                       | 110,00 | 45,544                |          |                       | 1850 | 77,0                  |
|                              |                       | 121,11 | 54,520                |          |                       | 1900 | 86,2                  |
|                              |                       | 132,22 | 64,751                |          |                       | 1950 | 96,0                  |
|                              |                       | 137,78 | 70,363                |          |                       | 2000 | 106,3                 |
|                              |                       | 143,33 | 76,340                |          |                       | 2050 | 117,0                 |
|                              |                       | 144,00 | 77,089                |          |                       |      |                       |
|                              |                       |        |                       | 950      | 1,086                 |      |                       |
|                              |                       |        |                       | 1000     | 1,693                 |      |                       |
| —34,04                       | 1,013                 |        |                       | 1050     | 2,527                 |      |                       |
| —23,33                       | 1,580                 |        |                       | 1100     | 3,629                 |      |                       |
| —12,22                       | 2,411                 |        |                       | 1150     | 5,038                 |      |                       |
| —1,11                        | 3,535                 |        |                       | 1200     | 6,790                 |      |                       |
| 10,00                        | 5,014                 |        |                       | 1250     | 8,889                 |      |                       |
| 21,11                        | 6,909                 |        |                       | 1300     | 11,41                 |      |                       |
|                              |                       |        |                       | 1350     | 15,0                  |      |                       |
|                              |                       |        |                       | 1400     | 18,7                  |      |                       |
|                              |                       |        |                       | 1450     | 22,9                  |      |                       |

## 11.3. ПАРЫ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Таблица 11.5. Температура насыщения органических веществ, К;  $p = 0,1 \div 100$  кПа [3]

В таблице приведены значения температуры, при которой устанавливается указанное давление пара

| Вещество                | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Адипиновая кислота      | 425,8              | 438,9 | 457,6 | 472,8 | 489,1 | 512,4 | 531,6 | 552,3 | 582,2 | 607,1 |
| Акриловая кислота       | 272,5              | 282,1 | 296,0 | 307,5 | 319,8 | 337,8 | 352,8 | 369,2 | 393,3 | 413,8 |
| Акрилонитрил            | 217,5              | 226,1 | 238,4 | 248,7 | 259,9 | 276,4 | 290,3 | 305,7 | 328,8 | 348,7 |
| Акролеин                | 204,3              | 212,1 | 223,4 | 232,8 | 243,0 | 258,0 | 270,6 | 284,5 | 305,3 | 323,1 |
| Аллен                   | 148,9              | 154,6 | 162,8 | 169,7 | 177,2 | 188,1 | 197,4 | 207,5 | 222,7 | 235,8 |
| Аллилдихлорэтилсилан    | 265,1              | 275,4 | 290,1 | 302,4 | 315,8 | 335,3 | 351,8 | 370,1 | 397,2 | 420,6 |
| Аллилизопропиловый эфир | 225,5              | 233,9 | 246,1 | 256,1 | 267,0 | 283,0 | 296,4 | 311,1 | 332,9 | 351,5 |
| Аллилизотиоцианат       | 267,8              | 278,1 | 293,0 | 305,4 | 318,8 | 338,5 | 355,1 | 373,5 | 400,8 | 424,3 |
| Аллиловый спирт         | 249,4              | 257,7 | 269,7 | 279,5 | 290,1 | 305,3 | 318,0 | 331,7 | 351,8 | 368,7 |
| Аллилпропиловый эфир    | 229,4              | 238,2 | 250,8 | 261,3 | 272,6 | 289,3 | 303,3 | 318,8 | 341,8 | 361,5 |
| Аллилтрихлорсилан       | 248,8              | 258,1 | 271,5 | 282,6 | 294,6 | 312,2 | 327,0 | 343,3 | 367,4 | 388,0 |
| Амилпропионат           | 276,7              | 287,1 | 302,0 | 314,4 | 327,8 | 347,5 | 364,0 | 382,1 | 409,0 | 432,1 |
| Амилловый спирт         | 281,5              | 290,5 | 303,3 | 313,8 | 325,1 | 341,2 | 354,6 | 369,0 | 390,0 | 407,5 |
| трет-Амилловый спирт    | 256,3              | 264,6 | 276,4 | 286,1 | 296,5 | 311,5 | 323,9 | 337,3 | 356,8 | 373,1 |
| Амилтриметилсилан       | 258,8              | 268,8 | 283,1 | 295,0 | 308,0 | 327,0 | 342,9 | 360,6 | 386,9 | 409,5 |
| Анизол                  | 273,3              | 283,5 | 298,3 | 310,5 | 323,8 | 343,2 | 359,4 | 377,3 | 403,9 | 426,7 |
| Анилин                  | 300,4              | 310,9 | 325,9 | 338,3 | 351,7 | 371,1 | 387,2 | 404,8 | 430,7 | 452,6 |
| 2-Анилинэтанол          | 371,3              | 383,8 | 401,8 | 416,5 | 432,4 | 455,3 | 474,3 | 495,0 | 525,2 | 550,7 |
| Анисовый альдегид       | 340,5              | 352,7 | 370,2 | 384,6 | 400,3 | 422,9 | 441,9 | 462,6 | 493,2 | 519,2 |
| Ацетальдегид            | 187,9              | 194,8 | 204,8 | 213,1 | 222,0 | 235,1 | 246,1 | 258,1 | 276,0 | 291,2 |
| Ацетальдоксим           | 263,1              | 271,8 | 284,3 | 294,5 | 305,4 | 321,2 | 334,3 | 348,4 | 369,1 | 386,5 |
| Ацетамид                | 332,6              | 343,8 | 359,9 | 373,1 | 387,3 | 407,8 | 424,8 | 443,3 | 470,4 | 493,2 |
| Ацетанилид              | 380,9              | 394,2 | 413,4 | 429,2 | 446,3 | 471,0 | 491,6 | 514,1 | 547,2 | 575,2 |
| Ацетилен                | 127,8              | 132,1 | 138,2 | 143,2 | 148,5 | 156,3 | 162,7 | 169,6 | 179,8 | 188,4 |
| Ацегон                  | 209,7              | 217,5 | 228,9 | 238,3 | 248,5 | 263,4 | 275,9 | 289,7 | 310,2 | 327,7 |
| Ацетонитрил             | 221,5              | 230,0 | 242,5 | 252,8 | 264,1 | 280,6 | 294,5 | 309,9 | 332,9 | 352,6 |
| Ацетофенон              | 304,5              | 315,8 | 332,1 | 345,5 | 360,1 | 381,5 | 399,4 | 419,0 | 448,2 | 473,0 |
| Бензальдегид            | 292,6              | 303,1 | 318,1 | 330,6 | 344,0 | 363,5 | 379,9 | 397,7 | 424,1 | 446,4 |
| Бензиламин              | 296,8              | 307,5 | 323,0 | 335,7 | 349,5 | 369,6 | 386,4 | 404,9 | 432,1 | 455,2 |
| Бензилдихлорсилан       | 312,9              | 323,5 | 338,7 | 351,2 | 364,7 | 384,1 | 400,2 | 417,8 | 443,5 | 465,1 |
| Бензилизотиоцианат      | 347,0              | 358,8 | 375,5 | 389,3 | 404,1 | 425,5 | 443,2 | 462,5 | 490,8 | 514,6 |
| Бензилловый спирт       | 323,6              | 334,1 | 349,2 | 361,5 | 374,8 | 393,9 | 409,6 | 426,7 | 451,6 | 472,5 |
| Бензоил хлористый       | 299,7              | 310,9 | 327,1 | 340,5 | 355,0 | 376,3 | 394,2 | 413,8 | 443,0 | 468,0 |
| Бензойная кислота       | 360,9              | 372,2 | 388,4 | 401,6 | 415,7 | 435,9 | 452,6 | 470,6 | 496,7 | 518,5 |
| Бензол                  | 229,3              | 237,3 | 248,9 | 258,4 | 268,7 | 283,6 | 296,0 | 309,5 | 329,5 | 346,4 |
| Бензолсульфонилхлорид   | 323,1              | 345,7 | 363,8 | 378,9 | 395,2 | 419,1 | 439,2 | 461,3 | 494,2 | 522,4 |
| Бензонитрил             | 312,0              | 323,3 | 339,6 | 353,1 | 367,7 | 388,9 | 406,6 | 426,1 | 454,8 | 479,3 |

| Вещество                            | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Бистрихлорсилан                     | —                  | —     | 331,0 | 344,7 | 359,5 | 381,2 | 399,4 | 419,5 | 449,3 | 474,8 |
| Боринкарбонил                       | 131,3              | 136,3 | 143,7 | 149,8 | 156,4 | 166,1 | 174,3 | 183,3 | 196,8 | 208,5 |
| 4-Броманизол                        | 316,3              | 328,1 | 345,2 | 359,3 | 374,7 | 397,1 | 416,0 | 436,7 | 467,5 | 493,8 |
| Бромбензол                          | 270,8              | 281,1 | 295,9 | 308,2 | 321,6 | 341,2 | 357,6 | 375,8 | 402,7 | 425,9 |
| 1-Бромбутан                         | 235,5              | 244,5 | 257,6 | 268,4 | 280,2 | 297,5 | 312,0 | 328,1 | 352,0 | 372,6 |
| 1-Бром-2-бутанол                    | 292,5              | 301,5 | 314,3 | 324,8 | 335,9 | 351,9 | 365,0 | 379,2 | 399,7 | 416,7 |
| 1-Бром-2-бутанон                    | 274,6              | 284,4 | 298,4 | 310,0 | 322,6 | 340,8 | 356,0 | 372,7 | 397,2 | 418,1 |
| <i>цис</i> -2-Бром-2-бутен          | 229,4              | 238,3 | 251,1 | 261,8 | 273,4 | 290,4 | 304,8 | 320,7 | 344,4 | 364,7 |
| <i>транс</i> -2-Бром-2-бутен        | 223,5              | 232,2 | 244,8 | 255,2 | 266,6 | 283,3 | 297,4 | 312,9 | 336,2 | 356,2 |
| 2-Бром-4,6-дихлорфенол              | 351,4              | 364,1 | 382,5 | 397,6 | 414,0 | 437,9 | 457,9 | 479,7 | 512,1 | 539,6 |
| Бромистый бензол                    | 314,6              | 326,3 | 343,2 | 357,2 | 372,3 | 394,5 | 413,1 | 433,5 | 463,9 | 489,8 |
| 2-Бром-1,4-ксилол                   | 304,8              | 316,3 | 332,8 | 346,5 | 361,3 | 383,0 | 401,3 | 421,4 | 451,2 | 476,7 |
| 1-Бром-3-метилбутан                 | 247,7              | 257,2 | 270,8 | 282,2 | 294,5 | 312,5 | 327,8 | 344,5 | 369,5 | 390,9 |
| 2-Бром-2-нитроизопропан             | 235,3              | 243,5 | 255,3 | 265,0 | 275,4 | 290,6 | 303,2 | 317,0 | 337,2 | 354,3 |
| 3-Бромпиридин                       | 284,3              | 295,0 | 310,3 | 323,0 | 336,8 | 357,0 | 373,9 | 392,5 | 420,2 | 443,8 |
| 1-Бромпропан                        | 215,6              | 226,9 | 235,9 | 245,8 | 256,7 | 272,5 | 285,9 | 300,7 | 322,7 | 341,6 |
| 2-Бромпропан                        | 207,0              | 215,1 | 226,8 | 236,5 | 247,1 | 262,7 | 275,9 | 290,4 | 312,1 | 330,9 |
| $\alpha$ -Бромтолуол                | 299,8              | 311,1 | 327,4 | 341,0 | 355,7 | 377,2 | 395,3 | 415,2 | 444,8 | 470,1 |
| 2-Бромтолуол                        | 291,4              | 302,1 | 317,4 | 330,1 | 343,9 | 364,0 | 380,8 | 399,2 | 426,4 | 449,7 |
| 3-Бромтолуол                        | 287,4              | 298,6 | 314,8 | 328,4 | 343,1 | 364,7 | 383,0 | 403,1 | 433,3 | 459,4 |
| 4-Бромтолуол                        | 283,2              | 294,6 | 311,1 | 324,9 | 340,0 | 362,3 | 381,2 | 402,2 | 433,7 | 461,0 |
| 3-Бром-2,4,6-трихлорфенол           | 380,2              | 393,8 | 413,2 | 429,3 | 446,6 | 471,8 | 492,8 | 515,8 | 549,7 | 578,5 |
| Бромуксусная кислота                | 322,7              | 333,6 | 349,3 | 362,2 | 376,0 | 396,1 | 412,7 | 430,8 | 457,3 | 479,6 |
| 1,4-Бромхлорбензол                  | 299,7              | 310,9 | 327,1 | 340,5 | 355,1 | 376,3 | 394,2 | 413,8 | 442,9 | 467,9 |
| 1-Бром-1-хлорэтан                   | 230,6              | 238,7 | 250,4 | 260,1 | 270,5 | 285,6 | 298,2 | 311,9 | 332,2 | 349,3 |
| 1-Бром-2-хлорэтан                   | 239,6              | 248,7 | 261,9 | 272,8 | 284,7 | 302,1 | 316,7 | 332,8 | 356,8 | 377,4 |
| 1-Бром-4-этилбензол                 | 292,9              | 305,0 | 322,6 | 337,3 | 353,5 | 377,3 | 397,7 | 420,3 | 454,5 | 484,3 |
| (2-Бромэтил)-бензол                 | 315,4              | 327,1 | 344,0 | 357,9 | 373,0 | 395,1 | 413,7 | 434,0 | 464,2 | 490,0 |
| 1-Бромэтилен                        | 174,3              | 181,5 | 192,0 | 200,7 | 210,2 | 224,4 | 236,4 | 249,8 | 270,0 | 287,6 |
| 2-Бромэтиловый-2-хлор-этиловый эфир | 304,2              | 315,2 | 331,1 | 344,1 | 358,3 | 378,8 | 396,1 | 414,9 | 442,8 | 466,4 |
| (2-Бромэтил)-циклогексан            | 305,6              | 317,2 | 334,1 | 348,0 | 363,2 | 385,5 | 404,2 | 424,8 | 455,6 | 482,0 |
| 1,2-Бутадиен                        | 179,9              | 186,9 | 197,2 | 205,8 | 215,1 | 228,8 | 240,4 | 253,2 | 272,4 | 289,0 |
| 1,3-Бутадиен                        | 166,6              | 173,2 | 182,6 | 190,5 | 199,0 | 211,6 | 222,2 | 234,0 | 251,6 | 266,7 |
| Бутан                               | 168,0              | 174,6 | 184,2 | 192,3 | 201,0 | 213,8 | 224,7 | 236,7 | 254,7 | 270,3 |
| 1,3-Бутандиол                       | 299,0              | 311,3 | 329,1 | 343,9 | 360,2 | 384,3 | 404,7 | 427,5 | 461,8 | 491,6 |
| 2,3-Бутандиол                       | 312,4              | 322,5 | 337,0 | 348,8 | 361,4 | 379,7 | 394,7 | 411,0 | 434,8 | 454,6 |
| 2-Бутанон                           | 220,3              | 228,8 | 241,1 | 251,3 | 262,5 | 278,9 | 292,6 | 307,9 | 330,6 | 350,2 |
| 1,2,3-Бутантриол                    | 370,3              | 382,3 | 399,3 | 413,2 | 428,1 | 449,5 | 467,2 | 486,4 | 514,2 | 537,5 |
| 1-Бутен                             | 164,8              | 171,3 | 180,6 | 188,5 | 197,0 | 209,5 | 220,1 | 231,9 | 249,4 | 264,6 |
| <i>цис</i> -2-Бутен                 | 172,6              | 179,3 | 188,9 | 196,9 | 205,6 | 218,4 | 229,2 | 241,1 | 258,8 | 274,1 |
| <i>транс</i> -2-Бутен               | 169,8              | 176,4 | 186,0 | 194,0 | 202,7 | 215,5 | 226,3 | 238,2 | 256,1 | 271,4 |
| Бутенин                             | 176,1              | 182,7 | 192,3 | 200,2 | 208,8 | 221,5 | 232,1 | 243,7 | 261,1 | 275,9 |
| 3-Бутенинитрил                      | 248,7              | 258,1 | 271,6 | 282,8 | 294,9 | 312,7 | 327,6 | 344,1 | 368,5 | 389,4 |
| Бутакилат                           | 267,4              | 277,4 | 291,9 | 303,9 | 316,9 | 335,9 | 351,9 | 369,4 | 395,5 | 417,9 |
| <i>втор</i> -Бутилгликолат          | 296,3              | 306,8 | 321,8 | 334,1 | 347,5 | 366,8 | 383,0 | 400,6 | 426,5 | 448,5 |
| Бутиловый спирт                     | 268,1              | 276,7 | 289,0 | 299,1 | 309,9 | 325,4 | 338,2 | 352,0 | 372,2 | 389,0 |
| <i>втор</i> -Бутиловый спирт        | 256,8              | 265,0 | 276,6 | 286,1 | 296,2 | 310,8 | 322,9 | 335,9 | 354,8 | 370,6 |
| <i>трет</i> -Бутиловый спирт        | 247,9              | 255,5 | 266,4 | 275,2 | 284,6 | 298,1 | 309,2 | 321,1 | 338,4 | 352,8 |
| Бутилтриметилсилан                  | 244,8              | 254,1 | 267,5 | 278,7 | 290,8 | 308,5 | 323,5 | 339,9 | 364,4 | 385,4 |
| Бутилформат                         | 242,2              | 251,2 | 264,2 | 275,0 | 286,7 | 303,8 | 318,1 | 333,9 | 357,3 | 377,3 |
| <i>втор</i> -Бутилформат            | 234,3              | 243,0 | 255,6 | 266,0 | 277,4 | 293,9 | 307,8 | 323,0 | 345,7 | 365,1 |
| <i>трет</i> -Бутилформат            | 235,6              | 244,4 | 257,2 | 267,8 | 279,3 | 296,1 | 310,3 | 325,8 | 348,9 | 368,7 |
| <i>втор</i> -Бутилхлорацетат        | 285,0              | 295,3 | 310,3 | 322,7 | 336,1 | 355,6 | 371,9 | 389,8 | 416,3 | 438,9 |
| <i>втор</i> -Бутилхлорид            | 208,8              | 217,3 | 229,5 | 239,8 | 251,0 | 267,4 | 281,4 | 297,0 | 320,4 | 340,7 |
| <i>трет</i> -Бутилхлорид            | —                  | —     | —     | —     | 236,9 | 252,8 | 266,3 | 281,3 | 303,9 | 323,6 |
| 1-Бутин                             | 176,7              | 183,5 | 193,2 | 201,4 | 210,2 | 223,2 | 234,1 | 246,1 | 264,0 | 279,4 |
| 2-Бутин                             | 194,7              | 201,5 | 211,4 | 219,5 | 228,3 | 241,1 | 251,7 | 263,3 | 280,4 | 294,8 |
| Бутиронитрил                        | 248,1              | 257,4 | 270,8 | 282,0 | 294,0 | 311,7 | 326,5 | 342,8 | 367,0 | 387,7 |
| Валериановая кислота                | 310,9              | 321,2 | 335,9 | 347,9 | 360,9 | 379,5 | 395,0 | 411,7 | 436,2 | 456,7 |
| $\alpha$ -Валеролактон              | 304,3              | 315,8 | 332,4 | 346,1 | 361,1 | 382,9 | 401,2 | 421,4 | 451,4 | 477,2 |
| Валеронитрил                        | 262,3              | 272,2 | 286,5 | 298,3 | 311,2 | 330,0 | 345,9 | 363,3 | 389,2 | 411,4 |

| Вещество                                      | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Ванилин                                       | 374,7              | 387,5 | 405,7 | 420,7 | 436,8 | 460,1 | 479,4 | 500,5 | 531,3 | 557,3 |
| Винилацетат                                   | 221,2              | 229,4 | 241,4 | 251,2 | 261,9 | 277,5 | 290,7 | 305,1 | 326,5 | 344,8 |
| Винилтрихлорсилан                             | —                  | —     | 246,6 | 257,4 | 269,2 | 286,5 | 301,1 | 317,4 | 341,7 | 362,8 |
| Винилтриэтоксисилоксан                        | —                  | —     | 304,3 | 316,5 | 329,8 | 349,2 | 365,4 | 383,2 | 409,6 | 432,2 |
| 1,5-Гексадиен-3-ин                            | 223,5              | 232,1 | 244,6 | 255,0 | 266,2 | 282,8 | 296,7 | 312,1 | 335,1 | 354,9 |
| Гексаметилдисилоксан                          | 239,7              | 248,5 | 261,1 | 271,6 | 282,9 | 299,4 | 313,2 | 328,3 | 350,8 | 369,9 |
| Гексаметилциклотрисилоксан                    | —                  | —     | —     | —     | —     | 330,5 | 345,4 | 361,8 | 386,0 | 406,6 |
| Гексан                                        | 214,6              | 222,8 | 234,6 | 244,4 | 255,1 | 270,8 | 284,0 | 298,5 | 320,1 | 338,7 |
| 1-Гексанол                                    | 292,5              | 302,1 | 315,8 | 327,0 | 339,0 | 356,3 | 370,6 | 386,1 | 408,7 | 427,6 |
| 2-Гексанол                                    | 281,7              | 290,8 | 303,7 | 314,3 | 325,6 | 342,0 | 355,4 | 370,0 | 391,3 | 409,0 |
| 3-Гексанол                                    | 271,3              | 280,7 | 294,2 | 305,3 | 317,2 | 334,6 | 349,0 | 364,7 | 387,8 | 407,3 |
| 2-Гексанон                                    | 276,4              | 285,2 | 297,7 | 308,0 | 318,9 | 334,6 | 347,6 | 361,6 | 382,0 | 399,0 |
| Гексахлорбензол                               | 382,9              | 396,7 | 416,5 | 432,8 | 450,4 | 476,1 | 497,5 | 521,0 | 555,6 | 585,0 |
| Гексахлорэтан                                 | 298,7              | 309,6 | 325,3 | 338,2 | 352,2 | 372,6 | 389,7 | 408,4 | 436,1 | 459,7 |
| 1-Гексен                                      | 211,2              | 219,4 | 231,3 | 241,2 | 251,9 | 267,7 | 281,0 | 295,7 | 317,6 | 336,6 |
| Гептан                                        | 234,4              | 243,3 | 256,1 | 266,7 | 278,3 | 295,2 | 309,5 | 325,1 | 348,5 | 368,5 |
| 1-Гептанол                                    | 308,9              | 318,7 | 332,5 | 343,9 | 356,0 | 373,4 | 387,7 | 403,1 | 425,6 | 444,3 |
| 2-Гептанон                                    | 289,1              | 298,7 | 312,3 | 323,4 | 335,4 | 352,6 | 366,9 | 382,4 | 405,0 | 424,0 |
| 4-Гептанон                                    | 291,7              | 300,7 | 314,3 | 323,8 | 334,9 | 350,8 | 363,9 | 378,0 | 398,4 | 415,3 |
| 2-Гептен                                      | 232,7              | 241,6 | 254,6 | 265,4 | 277,1 | 294,3 | 308,7 | 324,7 | 348,6 | 369,1 |
| Гидрохинон                                    | 392,4              | 404,0 | 420,5 | 433,9 | 448,1 | 468,5 | 485,2 | 503,1 | 528,9 | 550,2 |
| Гликоляцетат                                  | 306,0              | 316,8 | 332,2 | 344,8 | 358,5 | 378,3 | 394,8 | 412,9 | 439,4 | 461,8 |
| Глицерин                                      | 391,7              | 403,7 | 420,7 | 434,6 | 449,4 | 470,7 | 488,1 | 506,9 | 534,1 | 556,6 |
| Глутаровая кислота                            | 423,8              | 435,2 | 451,4 | 464,4 | 478,2 | 497,7 | 513,6 | 530,5 | 554,7 | 574,5 |
| Глутаровый ангидрид                           | 368,5              | 381,5 | 400,2 | 415,7 | 432,4 | 456,6 | 476,8 | 498,8 | 531,4 | 558,9 |
| Глутаронитрил                                 | 357,9              | 371,2 | 390,4 | 406,2 | 423,5 | 448,6 | 469,7 | 492,9 | 527,3 | 556,7 |
| Глутерилхлорид                                | 324,0              | 335,4 | 351,7 | 365,1 | 379,5 | 400,5 | 418,0 | 437,0 | 465,1 | 488,8 |
| Дегидрацетовая кислота                        | 359,0              | 371,4 | 389,4 | 404,1 | 420,0 | 443,0 | 462,2 | 483,1 | 513,9 | 539,9 |
| Диаллилдихлорсилан                            | 277,2              | 287,6 | 302,8 | 315,4 | 329,0 | 349,0 | 365,8 | 384,3 | 411,8 | 435,4 |
| Диаллилсульфид                                | 258,6              | 268,5 | 282,9 | 294,8 | 307,8 | 326,8 | 342,8 | 360,5 | 386,8 | 409,4 |
| Диацетамид                                    | 336,7              | 347,8 | 363,6 | 376,7 | 390,6 | 410,8 | 427,5 | 445,5 | 471,9 | 494,1 |
| 1,4-Дибромбензол                              | 320,7              | 331,9 | 347,9 | 361,1 | 375,4 | 396,0 | 413,2 | 432,0 | 459,6 | 482,9 |
| 1,2-Дибромбутан                               | 275,4              | 286,1 | 301,4 | 314,2 | 328,1 | 348,4 | 365,6 | 384,6 | 412,8 | 437,2 |
| dl-2,3-Дибромбутан                            | 272,5              | 283,0 | 298,1 | 310,7 | 324,4 | 344,5 | 361,4 | 380,1 | 407,9 | 431,8 |
| мезо-2,3-Дибромбутан                          | 269,6              | 280,0 | 295,0 | 307,5 | 321,1 | 341,0 | 357,8 | 376,3 | 404,0 | 427,8 |
| 1,4-Дибромбутан                               | 299,5              | 310,7 | 326,9 | 340,4 | 355,0 | 376,3 | 394,2 | 413,9 | 443,2 | 468,2 |
| $\alpha$ , $\beta$ -Диброммаленновый ангидрид | 317,8              | 329,3 | 345,7 | 359,3 | 374,1 | 395,5 | 413,4 | 433,0 | 461,9 | 486,6 |
| Дибромметан                                   | 234,0              | 242,9 | 255,8 | 266,5 | 278,2 | 295,2 | 309,6 | 325,4 | 349,0 | 369,2 |
| 1,2-Дибром-2-метилпропан                      | 238,5              | 249,3 | 265,0 | 278,4 | 293,1 | 315,2 | 334,2 | 355,7 | 388,7 | 418,0 |
| 1,3-Дибром-2-метилпропан                      | 282,0              | 292,6 | 308,0 | 320,7 | 334,6 | 354,8 | 371,8 | 390,5 | 418,3 | 442,2 |
| 1,2-Дибромпентан                              | 287,9              | 298,5 | 313,7 | 326,3 | 340,0 | 359,9 | 376,6 | 394,9 | 422,0 | 445,2 |
| 1,2-Дибромпропан                              | 261,1              | 271,0 | 285,4 | 297,3 | 310,2 | 329,1 | 345,1 | 362,6 | 388,8 | 411,2 |
| 2,3-Дибром-1-пропанол                         | 324,5              | 335,9 | 352,2 | 365,7 | 380,2 | 401,3 | 418,9 | 438,1 | 466,3 | 490,2 |
| 2,3-Дибромпропилен                            | 262,1              | 272,1 | 286,4 | 298,4 | 311,3 | 330,3 | 346,2 | 363,8 | 389,9 | 412,3 |
| 1,2-Дибромэтан                                | 245,6              | 255,9 | 270,9 | 283,5 | 297,3 | 317,7 | 335,2 | 354,6 | 384,1 | 409,9 |
| (1,2-Дибромэтил)-бензол                       | 353,8              | 365,8 | 382,9 | 397,0 | 412,1 | 434,0 | 452,2 | 471,9 | 500,8 | 525,1 |
| Ди-(2-бромэтиловый) эфир                      | 315,1              | 326,5 | 342,8 | 356,4 | 371,0 | 392,3 | 410,1 | 429,6 | 458,4 | 482,9 |
| Дибутилдисульфид                              | 299,5              | 315,2 | 338,8 | 359,1 | 382,0 | 417,1 | 448,3 | 484,6 | 526,6 | 566,6 |
| Дибутилсульфид                                | 292,5              | 303,4 | 319,2 | 332,2 | 346,3 | 367,0 | 384,3 | 403,4 | 431,7 | 455,9 |
| Диизобутиламин                                | 263,1              | 273,0 | 287,2 | 298,9 | 311,7 | 330,4 | 346,1 | 363,3 | 388,9 | 410,8 |
| Диизопропиловый эфир                          | 211,7              | 219,9 | 231,8 | 241,8 | 252,6 | 268,4 | 281,8 | 296,6 | 318,7 | 337,8 |
| Диизопропиллоксалат                           | 311,2              | 321,9 | 337,2 | 349,8 | 363,3 | 382,9 | 399,2 | 417,0 | 443,0 | 465,0 |
| Диметиламин                                   | 181,6              | 188,2 | 197,6 | 205,4 | 213,9 | 226,1 | 236,4 | 247,6 | 264,2 | 278,3 |
| N, N-Диметиланилин                            | 297,4              | 308,6 | 324,6 | 338,0 | 352,4 | 373,6 | 391,3 | 410,9 | 439,9 | 464,7 |
| Диметиларсенилат                              | 283,5              | 293,6 | 308,2 | 320,2 | 333,2 | 352,0 | 367,8 | 385,1 | 410,5 | 432,1 |
| 2,2-Диметилбутан                              | 199,6              | 207,4 | 218,8 | 228,2 | 238,5 | 253,6 | 266,4 | 280,5 | 301,6 | 319,9 |
| 2,3-Диметилбутан                              | 205,3              | 213,3 | 224,9 | 234,6 | 245,1 | 260,6 | 273,6 | 288,1 | 309,7 | 328,3 |
| 2,2-Диметилгексан                             | 238,8              | 247,9 | 261,0 | 272,0 | 283,8 | 301,2 | 315,9 | 332,0 | 356,1 | 376,7 |
| 2,3-Диметилгексан                             | 244,9              | 254,2 | 267,6 | 278,8 | 290,9 | 308,6 | 323,5 | 340,0 | 364,4 | 385,4 |

| Вещество                         | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| 2,4-Диметилгексан                | 239,6              | 248,9 | 262,2 | 273,3 | 285,4 | 303,1 | 318,0 | 334,5 | 359,0 | 380,2 |
| 2,5-Диметилгексан                | 241,1              | 250,2 | 263,4 | 274,3 | 286,2 | 303,5 | 318,1 | 334,2 | 358,1 | 378,6 |
| 3,3-Диметилгексан                | 241,7              | 250,9 | 264,3 | 275,3 | 287,3 | 304,9 | 319,8 | 336,1 | 360,4 | 381,3 |
| 3,4-Диметилгексан                | 245,9              | 255,2 | 268,8 | 280,0 | 292,2 | 310,0 | 325,1 | 341,6 | 366,3 | 387,4 |
| Диметилборан                     | 163,4              | 170,1 | 179,8 | 188,0 | 196,9 | 210,1 | 221,2 | 233,7 | 252,5 | 268,8 |
| Диметилдихлорсилан               | —                  | —     | 233,0 | 243,2 | 254,3 | 270,6 | 284,4 | 299,8 | 322,7 | 342,6 |
| Диметилитакокат                  | 337,6              | 347,9 | 362,7 | 374,7 | 387,5 | 405,9 | 420,9 | 437,2 | 460,7 | 480,2 |
| Диметил-1-малат                  | 342,5              | 354,4 | 371,4 | 385,4 | 400,5 | 422,4 | 440,6 | 460,5 | 489,6 | 514,3 |
| Диметилмалеат                    | 313,8              | 324,9 | 340,9 | 354,1 | 368,3 | 388,9 | 406,1 | 425,0 | 452,7 | 476,2 |
| Диметилмалонат                   | 302,9              | 313,3 | 328,2 | 340,4 | 353,5 | 372,6 | 388,4 | 405,6 | 430,9 | 452,2 |
| транс-Диметилзаконат             | 315,0              | 326,1 | 342,1 | 355,2 | 369,4 | 390,1 | 407,3 | 426,0 | 453,7 | 477,1 |
| Диметиловый эфир                 | 154,8              | 160,9 | 169,7 | 177,1 | 185,1 | 196,9 | 206,9 | 217,9 | 234,5 | 248,8 |
| Диметилосалат                    | 288,0              | 298,1 | 312,6 | 324,5 | 337,4 | 356,0 | 371,6 | 388,6 | 413,5 | 434,7 |
| 2,2-Диметилпентан                | 219,7              | 228,2 | 240,4 | 250,6 | 261,7 | 277,9 | 291,6 | 306,7 | 329,3 | 348,7 |
| 2,3-Диметилпентан                | 226,6              | 235,3 | 248,0 | 258,5 | 269,9 | 286,7 | 300,8 | 316,5 | 339,8 | 359,8 |
| 2,4-Диметилпентан                | 220,8              | 229,3 | 241,6 | 251,8 | 262,9 | 279,2 | 292,9 | 308,0 | 330,5 | 349,9 |
| 3,3-Диметилпентан                | 222,7              | 231,4 | 244,0 | 254,5 | 265,9 | 282,6 | 296,8 | 312,4 | 335,9 | 356,0 |
| 2,5-Диметил-3-пентанон           | 273,9              | 282,6 | 295,0 | 305,2 | 316,0 | 331,6 | 344,5 | 358,4 | 378,6 | 395,4 |
| 3,5-Диметил-1,2-пирон            | 346,1              | 357,9 | 374,8 | 388,7 | 403,6 | 425,1 | 443,1 | 462,6 | 491,1 | 515,2 |
| 2,2-Диметилпропан                | 167,2              | 174,3 | 184,7 | 193,4 | 203,0 | 217,2 | 229,3 | 242,9 | 263,5 | 281,5 |
| 4,6-Диметилрезорцин              | 162,7              | 168,1 | 174,7 | 183,3 | 193,1 | 203,6 | 214,6 | 226,3 | 240,4 | 256,2 |
| Диметилсилан                     | 154,6              | 160,8 | 169,8 | 177,4 | 185,6 | 197,7 | 208,0 | 219,5 | 236,6 | 251,5 |
| Диметилсульфид                   | 193,8              | 201,2 | 212,0 | 220,9 | 230,6 | 244,7 | 256,7 | 269,9 | 289,5 | 306,4 |
| Диметилсурьма                    | 311,9              | 323,4 | 339,9 | 353,6 | 368,5 | 390,1 | 408,3 | 428,2 | 457,7 | 482,9 |
| Диметил-dl-тарtrat               | 367,2              | 380,0 | 398,5 | 413,7 | 430,0 | 453,8 | 473,6 | 495,2 | 527,0 | 553,9 |
| Диметил-d-тарtrat                | 369,2              | 381,9 | 400,0 | 414,8 | 430,8 | 454,0 | 473,3 | 494,3 | 525,0 | 550,9 |
| 3,3-Диметил-2-тиобутан           | 233,8              | 242,7 | 255,5 | 266,1 | 277,6 | 294,5 | 308,7 | 324,3 | 347,6 | 367,5 |
| Диметилфенилсилан                | 272,7              | 283,1 | 298,0 | 310,5 | 324,0 | 343,8 | 360,4 | 378,8 | 406,1 | 429,6 |
| 1,1-Диметилциклогексан           | 244,2              | 253,6 | 267,3 | 278,7 | 291,2 | 309,4 | 324,7 | 341,7 | 367,1 | 388,9 |
| цис-1,2-Диметилциклогексан       | 251,6              | 261,3 | 275,3 | 286,9 | 299,5 | 318,5 | 333,6 | 350,8 | 376,5 | 398,5 |
| транс-1,2-Диметилциклогексан     | 246,9              | 256,5 | 270,4 | 281,9 | 294,4 | 312,8 | 328,3 | 345,5 | 371,1 | 393,1 |
| цис-1,3-Диметилциклогексан       | 248,4              | 257,9 | 271,7 | 283,2 | 295,7 | 314,0 | 329,4 | 346,4 | 371,8 | 393,7 |
| транс-1,3-Диметилциклогексан     | 245,5              | 254,9 | 268,5 | 279,8 | 292,2 | 310,2 | 325,4 | 342,2 | 367,2 | 388,7 |
| цис-1,4-Диметилциклогексан       | 247,9              | 257,5 | 271,4 | 282,9 | 295,4 | 313,7 | 329,2 | 346,3 | 371,8 | 393,8 |
| транс-1,4-Диметилциклогексан     | 243,7              | 253,2 | 266,9 | 278,3 | 290,8 | 309,0 | 324,4 | 341,5 | 366,9 | 388,8 |
| Диметилцитракопат                | 318,6              | 329,8 | 345,9 | 359,1 | 373,4 | 394,1 | 411,3 | 430,1 | 457,9 | 481,3 |
| α, α-Диметилантарный ангидрид    | 328,7              | 340,0 | 356,1 | 369,3 | 383,6 | 404,2 | 421,3 | 440,0 | 467,3 | 490,4 |
| 1,2-Диметоксизтан                | 220,3              | 229,4 | 242,6 | 253,6 | 265,6 | 283,4 | 298,6 | 315,5 | 340,9 | 363,1 |
| Ди-(2-метоксизтиловый) эфир      | 281,0              | 291,2 | 305,8 | 317,8 | 330,9 | 349,8 | 365,7 | 383,0 | 408,7 | 430,5 |
| Ди-(нитрозометил)-амин           | 270,8              | 281,0 | 295,7 | 307,9 | 321,1 | 340,5 | 356,7 | 374,6 | 401,2 | 424,0 |
| Ди-(нитрозозтил)-амин            | 285,8              | 296,6 | 312,1 | 324,9 | 338,9 | 359,3 | 376,5 | 395,4 | 423,4 | 447,5 |
| 1,4-Диоксан                      | 234,7              | 243,8 | 257,0 | 267,9 | 279,8 | 297,2 | 311,9 | 328,1 | 352,3 | 373,2 |
| 1,4-Диоксан-2,6-дион             | —                  | 352,5 | 369,4 | 383,4 | 398,4 | 420,3 | 438,4 | 458,2 | 487,3 | 511,9 |
| Дипропиленгликоль                | 342,4              | 353,8 | 370,0 | 383,3 | 397,6 | 418,2 | 435,3 | 453,8 | 480,9 | 503,6 |
| Дипропиловый эфир                | 225,5              | 234,3 | 247,0 | 257,5 | 269,0 | 285,9 | 300,2 | 315,9 | 339,4 | 359,7 |
| Дипропилоксалат                  | 320,4              | 331,7 | 347,8 | 361,1 | 375,5 | 396,3 | 413,7 | 432,6 | 460,5 | 484,1 |
| 1,2-Дипропоксизтан               | 228,0              | 239,8 | 257,3 | 272,4 | 289,3 | 315,2 | 338,1 | 364,6 | 406,8 | 445,8 |
| 1,1-Дифторэтан                   | 157,9              | 163,7 | 172,1 | 179,1 | 186,6 | 197,6 | 206,8 | 217,0 | 232,0 | 244,8 |
| 1,2-Дихлорбензол                 | 287,7              | 298,4 | 314,0 | 326,9 | 340,9 | 361,3 | 378,5 | 397,4 | 425,5 | 449,5 |
| 1,3-Дихлорбензол                 | 280,3              | 291,0 | 306,6 | 319,5 | 333,5 | 354,1 | 371,4 | 390,6 | 419,1 | 443,6 |
| 1,4-Дихлорбензол                 | —                  | —     | 309,2 | 322,1 | 336,1 | 356,6 | 373,9 | 393,0 | 421,3 | 445,7 |
| 1,2-Дихлорбутан                  | 244,1              | 253,8 | 267,9 | 279,6 | 292,3 | 311,1 | 327,0 | 344,6 | 371,0 | 393,9 |
| 2,3-Дихлорбутан                  | 243,1              | 252,5 | 266,1 | 277,4 | 289,6 | 307,7 | 322,9 | 339,7 | 364,8 | 386,3 |
| 1,5-Дихлоргексаметилтри-тилоксан | 293,6              | 304,4 | 320,0 | 332,9 | 346,8 | 367,2 | 384,3 | 403,0 | 430,8 | 454,5 |

| Вещество                                                  | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                           | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Дихлордиизопропиловый эфир                                | 297,6              | 308,2 | 323,5 | 336,1 | 349,7 | 369,5 | 386,0 | 404,0 | 430,7 | 453,3 |
| Дихлордиметилсилан                                        | 216,0              | 224,2 | 236,1 | 246,0 | 256,7 | 272,4 | 285,6 | 300,2 | 321,9 | 340,6 |
| Дихлордифторметан                                         | 151,7              | 157,6 | 166,1 | 173,1 | 180,8 | 192,1 | 201,6 | 212,1 | 227,8 | 241,3 |
| 1,2-Дихлор-1,2-дифторэтилен                               | 187,5              | 194,5 | 204,5 | 212,8 | 221,9 | 235,0 | 246,1 | 258,2 | 276,2 | 291,6 |
| Дихлордиэтилсилан                                         | 258,8              | 268,3 | 282,1 | 293,4 | 305,7 | 323,7 | 338,7 | 355,2 | 379,7 | 400,5 |
| Дихлорметан                                               | 199,4              | 206,9 | 217,7 | 226,6 | 236,3 | 250,5 | 262,4 | 275,5 | 295,0 | 311,6 |
| Дихлорметиларсан                                          | 256,4              | 266,2 | 280,4 | 292,1 | 304,9 | 323,6 | 339,4 | 356,7 | 383,6 | 404,8 |
| 1,1-Дихлор-2-метилпропан                                  | 237,9              | 247,1 | 260,3 | 271,4 | 283,4 | 301,0 | 315,9 | 332,3 | 356,7 | 377,8 |
| 1,2-Дихлор-2-метилпропан                                  | 242,7              | 251,7 | 264,8 | 275,6 | 287,3 | 304,4 | 318,8 | 334,6 | 358,1 | 378,1 |
| 1,3-Дихлор-2-метилпропан                                  | 265,7              | 275,3 | 289,0 | 300,4 | 312,7 | 330,7 | 345,6 | 362,0 | 386,3 | 406,9 |
| Дихлорметилсилан                                          | 193,7              | 201,4 | 212,5 | 221,7 | 231,8 | 246,7 | 259,2 | 273,1 | 293,9 | 311,9 |
| Дихлорметилфенилсилан                                     | 302,9              | 314,4 | 330,9 | 344,6 | 359,6 | 381,4 | 399,7 | 419,9 | 450,0 | 475,8 |
| 1,7-Дихлороктаметилтетрасилоксан                          | 320,4              | 332,1 | 348,8 | 362,7 | 377,7 | 399,6 | 417,9 | 438,0 | 467,7 | 493,0 |
| 1,2-Дихлорпропан                                          | 230,3              | 239,2 | 252,2 | 262,9 | 274,7 | 291,9 | 306,4 | 322,5 | 346,5 | 367,1 |
| 1,3-Дихлор-2-пропанол                                     | 295,6              | 305,9 | 320,7 | 332,8 | 346,0 | 365,0 | 380,9 | 398,2 | 423,6 | 445,1 |
| 2,3-Дихлорстирол                                          | 328,1              | 340,1 | 357,4 | 371,6 | 387,1 | 409,6 | 428,5 | 449,2 | 479,8 | 505,9 |
| 2,4-Дихлорстирол                                          | 320,7              | 332,5 | 349,5 | 363,5 | 378,7 | 400,9 | 419,5 | 439,9 | 470,1 | 495,9 |
| 2,5-Дихлорстирол                                          | 322,3              | 334,1 | 351,2 | 365,3 | 380,5 | 402,8 | 421,4 | 441,9 | 472,2 | 498,0 |
| 2,6-Дихлорстирол                                          | 315,3              | 326,9 | 343,7 | 357,5 | 372,5 | 394,4 | 412,8 | 432,9 | 462,7 | 488,2 |
| 3,4-Дихлорстирол                                          | 324,3              | 336,2 | 353,4 | 367,5 | 382,9 | 405,3 | 424,0 | 444,6 | 475,0 | 501,0 |
| 3,5-Дихлорстирол                                          | 321,3              | 333,0 | 350,0 | 363,9 | 379,1 | 401,2 | 419,7 | 440,0 | 470,0 | 495,6 |
| 1,3-Дихлортетраметилди-силоксан                           | 260,8              | 270,6 | 284,7 | 296,4 | 309,2 | 327,8 | 343,4 | 360,6 | 386,1 | 408,0 |
| 1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан                          | 174,2              | 180,8 | 190,4 | 198,3 | 207,0 | 219,6 | 230,2 | 241,9 | 259,3 | 274,3 |
| Дихлор-4-толилсилан                                       | 313,4              | 324,1 | 339,4 | 352,0 | 365,5 | 385,1 | 401,3 | 419,0 | 444,9 | 466,8 |
| $\alpha$ , $\alpha$ -Дихлортолуол                         | 302,3              | 314,1 | 331,3 | 345,5 | 361,1 | 383,9 | 403,2 | 424,6 | 456,5 | 484,1 |
| 3,4-Дихлор- $\alpha$ , $\alpha$ , $\alpha$ -трифтортолуол | 279,8              | 290,7 | 306,5 | 319,7 | 334,0 | 355,0 | 372,8 | 392,4 | 421,8 | 447,1 |
| Дихлоруксусная кислота                                    | 311,6              | 322,3 | 337,6 | 350,2 | 363,8 | 383,4 | 399,7 | 417,5 | 443,6 | 465,6 |
| Дихлорфениларсин                                          | 332,9              | 345,8 | 364,5 | 380,1 | 397,0 | 421,8 | 442,8 | 465,9 | 500,5 | 530,3 |
| $\alpha$ , $\alpha$ -Дихлорфенилацетонитрил               | 323,4              | 335,0 | 351,7 | 365,5 | 380,4 | 402,1 | 420,2 | 440,0 | 469,3 | 494,2 |
| 2,4-Дихлорфенол                                           | 320,6              | 331,7 | 347,6 | 360,6 | 374,7 | 395,1 | 412,1 | 430,5 | 457,7 | 480,6 |
| 2,6-Дихлорфенол                                           | 327,0              | 338,3 | 354,6 | 368,0 | 382,4 | 403,3 | 420,7 | 439,6 | 467,5 | 491,0 |
| Дихлорфторметан                                           | 178,5              | 185,2 | 195,0 | 203,1 | 211,9 | 224,8 | 235,6 | 247,5 | 265,3 | 280,5 |
| 1,2-Дихлорэтан                                            | 224,6              | 233,1 | 245,4 | 255,7 | 266,7 | 283,0 | 296,6 | 311,7 | 334,0 | 353,2 |
| 1,2-Дихлор-3-этилбензол                                   | 313,7              | 325,6 | 342,8 | 357,0 | 372,5 | 395,2 | 414,3 | 435,4 | 466,7 | 493,5 |
| 1,2-Дихлор-4-этилбензол                                   | 315,0              | 327,1 | 344,7 | 359,2 | 375,0 | 398,2 | 417,8 | 439,4 | 471,5 | 499,2 |
| 1,4-Дихлор-2-этилбензол                                   | 306,3              | 318,3 | 335,6 | 350,0 | 365,6 | 388,7 | 408,1 | 429,6 | 461,8 | 489,5 |
| 1,1-Дихлорэтилен                                          | 192,1              | 199,4 | 210,0 | 218,7 | 228,2 | 242,0 | 253,7 | 266,6 | 285,7 | 302,1 |
| <i>цис</i> -1,2-Дихлорэтилен                              | 211,2              | 219,1 | 230,5 | 239,9 | 250,2 | 265,2 | 277,8 | 291,6 | 312,1 | 329,7 |
| <i>транс</i> -1,2-Дихлорэтилен                            | 204,0              | 211,6 | 222,6 | 231,6 | 241,5 | 255,9 | 268,0 | 281,3 | 301,0 | 317,9 |
| Ди-(хлорэтиловый) эфир                                    | 291,1              | 301,7 | 317,1 | 329,8 | 343,5 | 363,5 | 380,3 | 398,7 | 425,9 | 449,1 |
| 1,2-Дихлортрихлорсилан                                    | —                  | —     | 314,9 | 328,0 | 342,1 | 362,9 | 380,3 | 399,5 | 428,0 | 452,5 |
| Дихлорэтилфенилсилан                                      | 315,4              | 327,4 | 344,8 | 359,2 | 374,8 | 397,7 | 417,0 | 438,2 | 469,9 | 497,0 |
| Ди-(2-хлорэтокси)-метан                                   | 320,5              | 331,8 | 348,2 | 361,6 | 376,1 | 397,2 | 414,8 | 434,1 | 462,4 | 486,4 |
| Дихлорэтоксиметилсилан                                    | 235,3              | 244,2 | 257,2 | 267,9 | 279,6 | 296,7 | 311,1 | 326,9 | 350,5 | 370,8 |
| Дихлорэтоксифенилсилан                                    | 319,3              | 330,9 | 347,7 | 361,6 | 376,6 | 398,6 | 416,9 | 437,0 | 466,8 | 492,2 |
| Дициан                                                    | 174,9              | 180,4 | 188,1 | 194,4 | 201,2 | 210,8 | 218,8 | 227,4 | 239,8 | 250,2 |
| Диэтиламин                                                | —                  | —     | 226,1 | 235,7 | 246,0 | 261,2 | 274,1 | 288,2 | 309,3 | 327,4 |
| Диэтилацеталь                                             | 245,5              | 254,2 | 266,7 | 277,1 | 288,2 | 304,4 | 317,9 | 332,7 | 354,4 | 372,9 |
| Диэтилдиксисукцинат                                       | 337,5              | 349,0 | 365,6 | 379,3 | 394,0 | 415,2 | 432,9 | 452,1 | 480,4 | 504,2 |
| Диэтилдифторсилан                                         | 212,9              | 220,7 | 231,9 | 241,2 | 251,2 | 265,8 | 278,1 | 291,5 | 311,4 | 328,4 |
| Диэтилдихлорсилан                                         | —                  | —     | 276,1 | 287,9 | 300,7 | 319,4 | 335,3 | 352,8 | 379,0 | 401,5 |
| Диэтиленгликоль                                           | 360,3              | 371,7 | 387,9 | 401,1 | 415,3 | 435,6 | 452,4 | 470,5 | 496,8 | 518,7 |
| Диэтиленгликоль, бутиловый эфир                           | 334,6              | 345,9 | 362,1 | 375,4 | 389,7 | 410,4 | 427,5 | 446,2 | 473,5 | 496,5 |

| Вещество                        | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Диэтиленгликоль, этиловый эфир  | 313,2              | 324,2 | 340,1 | 353,1 | 367,3 | 387,7 | 404,8 | 423,5 | 450,9 | 474,2 |
| Диэтиленгликоль-бис-хлорацетат  | 417,3              | 429,8 | 447,4 | 461,8 | 477,1 | 499,0 | 516,9 | 536,2 | 564,0 | 587,0 |
| Диэтилизосукцинат               | 307,2              | 318,3 | 334,4 | 347,6 | 361,9 | 382,8 | 400,3 | 419,4 | 447,7 | 471,8 |
| Диэтилкарбонат                  | 258,2              | 267,5 | 280,9 | 292,0 | 304,0 | 321,5 | 336,1 | 352,1 | 375,7 | 395,8 |
| Диэтилмалат                     | 347,7              | 359,9 | 377,4 | 391,7 | 407,3 | 429,8 | 448,6 | 469,0 | 499,2 | 524,6 |
| Диэтилмаллеинат                 | 324,6              | 336,2 | 353,0 | 366,8 | 381,8 | 403,6 | 421,8 | 441,7 | 471,1 | 496,0 |
| Диэтилмалонат                   | 308,4              | 319,5 | 335,4 | 348,6 | 362,8 | 383,5 | 400,8 | 419,7 | 447,7 | 471,4 |
| Диэтиловый эфир                 | 195,3              | 202,7 | 213,3 | 222,0 | 231,5 | 245,4 | 257,1 | 270,0 | 289,1 | 305,4 |
| Диэтилоксалат                   | 315,2              | 325,3 | 339,7 | 351,4 | 364,1 | 382,2 | 397,2 | 413,3 | 436,9 | 456,5 |
| Диэтилселенид                   | 242,9              | 252,0 | 265,0 | 275,8 | 287,5 | 304,6 | 319,0 | 334,7 | 358,2 | 378,1 |
| Диэтилсукцинат                  | 322,5              | 333,8 | 350,1 | 363,6 | 378,1 | 399,1 | 416,7 | 435,8 | 464,0 | 487,9 |
| Диэтилсульфат                   | 314,3              | 325,6 | 341,7 | 355,1 | 369,5 | 390,4 | 407,9 | 427,0 | 455,3 | 479,2 |
| Диэтилсульфид                   | 229,7              | 238,4 | 250,8 | 261,1 | 272,3 | 288,6 | 302,3 | 317,4 | 339,9 | 359,0 |
| Диэтилсульфит                   | 277,4              | 287,6 | 302,3 | 314,4 | 327,6 | 346,8 | 362,9 | 380,5 | 406,7 | 429,0 |
| Диэтил-d-тарtrat                | 369,2              | 381,9 | 400,0 | 414,9 | 430,9 | 454,1 | 473,4 | 494,4 | 525,2 | 551,1 |
| Диэтил-dl-тарtrat               | 367,4              | 380,2 | 398,4 | 413,4 | 429,6 | 453,0 | 472,6 | 493,8 | 525,0 | 551,4 |
| Диэтилфумарат                   | 320,7              | 332,2 | 348,7 | 362,4 | 377,1 | 398,6 | 416,5 | 436,2 | 465,1 | 489,7 |
| Диэтилцинк                      | 245,9              | 255,3 | 268,9 | 280,2 | 292,5 | 310,6 | 325,7 | 342,5 | 367,4 | 388,9 |
| Диэтоксидиметилсилан            | 249,0              | 258,1 | 271,2 | 281,9 | 293,6 | 310,6 | 324,9 | 340,4 | 363,5 | 383,2 |
| 1,3-Диэтокситетраметил-силоксан | 282,8              | 292,9 | 307,3 | 319,3 | 332,2 | 351,0 | 366,6 | 383,8 | 409,0 | 430,5 |
| 1,2-Диэтоксигтан                | 234,7              | 244,4 | 258,5 | 270,3 | 283,2 | 302,3 | 318,5 | 336,6 | 363,9 | 387,7 |
| Изоамилацетат                   | 267,9              | 277,7 | 291,7 | 303,4 | 316,0 | 334,4 | 349,7 | 366,6 | 391,6 | 412,8 |
| Изоамилнитрат                   | 272,9              | 282,7 | 296,9 | 308,5 | 321,2 | 339,6 | 354,9 | 371,7 | 396,6 | 417,7 |
| Изоамиловый спирт               | 278,5              | 287,2 | 299,7 | 309,9 | 320,7 | 336,4 | 349,2 | 363,1 | 383,2 | 400,0 |
| Изоамилформиат                  | 251,1              | 260,6 | 274,4 | 285,8 | 298,1 | 316,2 | 331,5 | 348,2 | 373,2 | 394,6 |
| Изобутиламин                    | 218,8              | 226,9 | 238,6 | 248,2 | 258,7 | 273,9 | 286,7 | 300,8 | 321,6 | 339,3 |
| Изобутилацетат                  | 247,3              | 256,7 | 270,2 | 281,5 | 293,7 | 311,5 | 326,5 | 343,1 | 367,7 | 388,8 |
| Изобутилбутират                 | 273,1              | 283,4 | 298,3 | 310,6 | 324,0 | 343,6 | 360,0 | 378,1 | 405,1 | 428,1 |
| Изобутилдихлорацетат            | 295,8              | 306,6 | 322,1 | 334,8 | 348,7 | 368,8 | 385,7 | 404,2 | 431,5 | 454,7 |
| Изобутилзобутират               | 272,3              | 282,2 | 296,4 | 308,1 | 320,8 | 339,3 | 354,7 | 371,7 | 396,7 | 418,0 |
| Изобутилкарбамат                | —                  | 335,8 | 351,2 | 363,8 | 377,4 | 397,1 | 413,3 | 431,0 | 456,7 | 478,4 |
| Изобутиловый спирт              | 260,0              | 268,5 | 280,6 | 290,5 | 301,1 | 316,3 | 328,9 | 342,6 | 362,5 | 379,2 |
| Изобутилпропионат               | 266,0              | 275,6 | 289,5 | 300,8 | 313,2 | 331,1 | 346,1 | 362,5 | 386,8 | 407,4 |
| Изобутилформиат                 | 236,3              | 245,1 | 257,9 | 268,4 | 279,9 | 296,7 | 310,7 | 326,2 | 349,2 | 368,8 |
| Изобутилхлорид                  | 215,3              | 223,5 | 235,3 | 245,1 | 255,7 | 271,3 | 284,4 | 298,9 | 320,4 | 338,8 |
| Изовалериановая кислота         | 302,9              | 313,0 | 327,4 | 339,2 | 352,0 | 370,3 | 385,5 | 402,0 | 426,1 | 446,3 |
| Изокапролактон                  | 305,7              | 317,2 | 333,7 | 347,4 | 362,3 | 384,0 | 402,3 | 422,4 | 452,2 | 477,7 |
| Изокапроновая кислота           | 327,8              | 338,0 | 352,6 | 364,5 | 377,2 | 395,4 | 410,4 | 426,6 | 450,1 | 469,6 |
| Изомасляная кислота             | 283,7              | 293,6 | 307,6 | 319,2 | 331,7 | 349,8 | 364,8 | 381,2 | 405,3 | 425,6 |
| Изопрен                         | 189,9              | 197,3 | 207,9 | 216,8 | 226,5 | 240,7 | 252,7 | 266,0 | 285,8 | 302,9 |
| Изопропилацетат                 | 230,7              | 239,3 | 251,7 | 262,0 | 273,2 | 289,5 | 303,1 | 318,2 | 340,5 | 359,5 |
| Изопропилзобутират              | 252,0              | 261,3 | 274,7 | 285,7 | 297,7 | 315,2 | 329,9 | 346,0 | 369,9 | 390,2 |
| Изопропиллеулинат               | 315,1              | 326,2 | 342,2 | 355,4 | 369,7 | 390,4 | 407,6 | 426,5 | 454,3 | 477,8 |
| Изопропилформиат                | 217,2              | 225,4 | 237,1 | 246,8 | 257,4 | 272,8 | 285,7 | 300,0 | 321,1 | 339,2 |
| Изопропилхлорацетат             | 272,3              | 282,3 | 296,7 | 308,6 | 321,5 | 340,4 | 356,1 | 373,5 | 399,1 | 421,0 |
| Иодбензол                       | 291,1              | 302,2 | 318,2 | 331,4 | 345,8 | 366,9 | 384,6 | 404,2 | 433,3 | 458,2 |
| 1-Иод-3-метилбутан              | 265,4              | 275,5 | 290,1 | 302,2 | 315,3 | 334,6 | 350,7 | 368,6 | 395,1 | 417,9 |
| 1-Иод-2-метилпропан             | 251,7              | 261,1 | 274,6 | 285,7 | 297,9 | 315,5 | 330,4 | 346,7 | 370,9 | 391,5 |
| 1-Иодоктан                      | 312,3              | 324,4 | 341,9 | 356,4 | 372,2 | 395,4 | 414,9 | 436,5 | 468,7 | 496,4 |
| 1-Иодпропан                     | 233,0              | 242,1 | 255,3 | 266,3 | 278,2 | 295,8 | 310,6 | 327,0 | 351,6 | 372,8 |
| 2-Иодпропан                     | 225,5              | 234,3 | 246,9 | 257,5 | 269,0 | 285,8 | 300,1 | 315,8 | 339,3 | 359,5 |
| 2-Иодтолуол                     | 304,6              | 316,2 | 333,1 | 347,1 | 362,3 | 384,6 | 403,4 | 424,1 | 454,9 | 481,4 |
| Каприловая кислота              | 355,5              | 366,2 | 381,4 | 393,7 | 406,8 | 425,6 | 441,1 | 457,6 | 481,6 | 501,4 |
| Каприловый альдегид             | 342,9              | 350,7 | 361,6 | 370,3 | 379,4 | 392,1 | 402,4 | 413,2 | 428,3 | 440,6 |
| Каприлонитрил                   | 308,4              | 319,5 | 335,5 | 348,7 | 362,9 | 383,7 | 401,0 | 420,0 | 448,1 | 471,9 |
| Капронитрил                     | 276,9              | 287,4 | 302,5 | 315,0 | 328,6 | 348,5 | 365,2 | 383,7 | 411,1 | 434,6 |
| Капроновая кислота              | 152,8              | 159,1 | 168,2 | 175,8 | 184,1 | 196,4 | 206,9 | 218,5 | 236,0 | 251,2 |
| Карбонилселенид                 | 305,8              | 316,4 | 331,7 | 344,3 | 357,9 | 377,6 | 394,0 | 411,9 | 438,1 | 460,4 |
| 2-Крезол                        | 318,0              | 328,6 | 343,9 | 356,4 | 369,9 | 389,3 | 405,4 | 422,9 | 448,5 | 470,1 |
| 3-Крезол                        | 319,3              | 329,9 | 345,1 | 357,6 | 370,9 | 390,2 | 406,2 | 423,6 | 448,9 | 470,2 |



| Вещество                           | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| 4-Крезол                           | —                  | —     | 335,4 | 347,5 | 360,6 | 379,3 | 394,9 | 411,7 | 436,4 | 457,1 |
| $\alpha$ -Кроотоновая кислота      | 301,4              | 311,4 | 325,6 | 337,3 | 349,9 | 367,9 | 382,9 | 399,1 | 422,8 | 442,7 |
| $\beta$ -Кроотоновая кислота       | 238,8              | 248,0 | 261,4 | 272,5 | 284,5 | 302,2 | 317,2 | 333,7 | 358,3 | 379,4 |
| <i>цис</i> -Кротононитрил          | 248,7              | 258,2 | 272,0 | 283,4 | 295,8 | 314,0 | 329,3 | 346,2 | 371,3 | 393,0 |
| <i>транс</i> -Кротононитрил        | 323,5              | 334,9 | 351,3 | 364,8 | 379,4 | 400,5 | 418,2 | 437,5 | 465,9 | 490,0 |
| 2,3-Ксиленол                       | 319,1              | 330,1 | 345,9 | 358,9 | 372,9 | 393,2 | 410,1 | 428,5 | 455,5 | 478,2 |
| 2,4-Ксиленол                       | 333,7              | 345,0 | 361,3 | 374,7 | 389,0 | 409,8 | 427,1 | 445,9 | 473,5 | 496,7 |
| 3,5-Ксиленол                       | 329,7              | 340,9 | 357,0 | 370,2 | 384,4 | 404,9 | 422,0 | 440,6 | 467,8 | 490,7 |
| 2,4-Ксилидин                       | 319,9              | 331,0 | 347,1 | 360,2 | 374,5 | 395,1 | 412,3 | 431,1 | 458,6 | 482,0 |
| 2,6-Ксилидин                       | 311,4              | 323,1 | 340,0 | 354,0 | 369,1 | 391,3 | 410,0 | 430,5 | 460,9 | 487,0 |
| 2-Ксилол                           | 263,9              | 273,9 | 288,2 | 300,1 | 313,1 | 332,0 | 347,9 | 365,4 | 391,4 | 413,7 |
| 3-Ксилол                           | 260,9              | 270,7 | 284,9 | 296,6 | 309,3 | 327,9 | 343,6 | 360,8 | 386,3 | 408,2 |
| 4-Ксилол                           | 259,7              | 269,5 | 283,7 | 295,4 | 308,2 | 326,8 | 342,5 | 359,7 | 385,4 | 407,4 |
| Левулиновая кислота                | 370,0              | 380,9 | 396,3 | 408,8 | 422,1 | 441,2 | 456,7 | 473,4 | 497,5 | 517,4 |
| Левулиновый альдегид               | 295,8              | 306,7 | 322,4 | 335,4 | 349,5 | 370,1 | 387,4 | 406,3 | 434,4 | 458,4 |
| Масляная кислота                   | 293,6              | 303,5 | 317,7 | 329,3 | 341,8 | 359,8 | 374,8 | 391,1 | 414,9 | 435,0 |
| Мезитила окись                     | 259,3              | 268,8 | 282,5 | 293,8 | 306,1 | 324,0 | 339,0 | 355,5 | 379,8 | 400,6 |
| Меркаптоуксусная кислота           | 328,2              | 339,4 | 355,3 | 368,4 | 382,5 | 402,9 | 419,8 | —     | —     | —     |
| Метакрилонитрил                    | 224,4              | 233,2 | 246,0 | 256,7 | 268,3 | 285,5 | 299,9 | 315,9 | 339,9 | 360,7 |
| Метакриловая кислота               | 293,1              | 302,9 | 316,9 | 328,3 | 340,7 | 358,5 | 373,2 | 389,2 | 412,6 | 432,3 |
| Метан                              | 66,2               | 69,0  | 73,1  | 76,5  | 80,3  | 85,9  | 90,7  | 96,0  | 104,1 | 111,2 |
| Метанол                            | 225,6              | 233,3 | 244,4 | 253,5 | 263,2 | 277,4 | 289,2 | 302,0 | 320,7 | 336,5 |
| Метилакрилат                       | 225,5              | 233,9 | 245,9 | 255,9 | 266,7 | 282,4 | 295,6 | 310,1 | 331,6 | 350,0 |
| Метиламин                          | 174,6              | 180,8 | 189,7 | 197,1 | 205,0 | 216,6 | 226,2 | 236,8 | 252,2 | 265,4 |
| <i>N</i> -Метиланилин              | 303,5              | 314,5 | 330,3 | 343,4 | 357,5 | 378,1 | 395,3 | 414,1 | 441,9 | 465,6 |
| Метилантрацилат                    | 344,1              | 356,9 | 375,5 | 390,8 | 407,5 | 431,8 | 452,2 | 474,7 | 508,0 | 536,5 |
| Метилацетат                        | 212,0              | 219,9 | 231,1 | 240,4 | 250,5 | 265,2 | 277,6 | 291,1 | 311,2 | 328,3 |
| Метилацетилен                      | 158,8              | 164,7 | 173,3 | 180,4 | 188,1 | 199,4 | 208,8 | 219,2 | 234,7 | 247,9 |
| $\alpha$ -Метилбензиловый спирт    | 316,5              | 327,4 | 343,0 | 355,9 | 369,7 | 389,7 | 406,4 | 424,5 | 451,2 | 473,6 |
| Метилбензоат                       | 305,3              | 316,3 | 332,2 | 345,2 | 359,4 | 380,0 | 397,2 | 416,1 | 443,9 | 467,6 |
| 2-Метилбензотиазол                 | 338,0              | 349,2 | 365,2 | 378,3 | 392,4 | 412,7 | 429,5 | 447,8 | 474,5 | 496,9 |
| Метилбромид                        | 173,4              | 180,1 | 189,7 | 197,7 | 206,4 | 219,2 | 230,0 | 241,8 | 259,6 | 274,8 |
| 2-Метилбутан                       | 186,9              | 194,1 | 204,6 | 213,3 | 222,8 | 236,8 | 248,5 | 261,5 | 280,9 | 297,6 |
| 3-Метил-2-бутанон                  | 249,0              | 257,0 | 268,3 | 277,6 | 287,5 | 301,8 | 313,5 | 326,2 | 344,7 | 360,2 |
| 2-Метил-1-бутен                    | 180,0              | 187,2 | 197,6 | 206,3 | 215,8 | 229,8 | 241,6 | 254,8 | 274,5 | 291,6 |
| 2-Метил-2-бутен                    | 194,5              | 202,0 | 213,0 | 222,0 | 231,9 | 246,4 | 258,6 | 272,1 | 292,2 | 309,6 |
| Метилбутират                       | 242,2              | 251,0 | 263,7 | 274,1 | 285,5 | 301,9 | 315,7 | 330,8 | 353,2 | 372,2 |
| 2-Метилгексан                      | 228,5              | 237,2 | 249,8 | 260,2 | 271,6 | 288,2 | 302,2 | 317,6 | 340,6 | 360,3 |
| 3-Метилгексан                      | 229,3              | 238,0 | 250,6 | 261,0 | 272,4 | 289,0 | 303,0 | 318,4 | 341,3 | 360,9 |
| 2-Метилгептан                      | 246,8              | 256,2 | 269,6 | 280,7 | 292,8 | 310,5 | 325,4 | 341,7 | 366,1 | 386,9 |
| 3-Метилгептан                      | 248,3              | 257,5 | 270,9 | 282,0 | 294,1 | 311,7 | 326,5 | 342,7 | 366,8 | 387,5 |
| 4-Метилгептан                      | 247,3              | 256,6 | 270,0 | 281,1 | 293,2 | 310,8 | 325,7 | 342,0 | 366,2 | 387,0 |
| 2-Метил-2-гептен                   | 252,2              | 261,6 | 275,1 | 286,4 | 298,6 | 316,4 | 331,3 | 347,7 | 372,1 | 392,9 |
| 6-Метил-3-гептен-2-ол              | 309,5              | 319,3 | 333,3 | 344,8 | 357,0 | 374,6 | 389,1 | 404,8 | 427,6 | 446,6 |
| 6-Метил-5-гептен-2-ол              | 310,4              | 320,2 | 334,2 | 345,6 | 357,8 | 375,4 | 389,9 | 405,5 | 428,2 | 447,1 |
| Метилгликолат                      | 277,8              | 287,7 | 301,9 | 313,6 | 326,2 | 344,6 | 359,9 | 376,6 | 401,3 | 422,2 |
| $\alpha$ -Метилглутаровый ангидрид | 360,4              | 373,5 | 392,2 | 407,7 | 424,5 | 449,0 | 469,4 | 491,8 | 524,9 | 553,0 |
| 2-Метилдисулазан                   | 193,0              | 200,3 | 211,0 | 219,9 | 229,5 | 243,6 | 255,5 | 268,6 | 288,1 | 304,8 |
| Метилдихлорацетат                  | 271,0              | 280,7 | 294,7 | 306,2 | 318,7 | 336,8 | 351,9 | 368,5 | 392,9 | 413,7 |
| Метилдихлорсилан                   | —                  | —     | 211,7 | 221,2 | 231,7 | 247,3 | 260,4 | 275,1 | 297,2 | 316,5 |
| Метилизобутират                    | 234,9              | 243,5 | 255,9 | 266,1 | 277,2 | 293,4 | 307,0 | 321,8 | 343,9 | 362,6 |
| Метилизобалерат                    | 249,2              | 258,4 | 271,7 | 282,7 | 294,7 | 312,1 | 326,7 | 342,7 | 366,4 | 386,7 |
| Метилизотиоцианат                  | 236,3              | 246,3 | 260,8 | 273,0 | 286,4 | 306,2 | 323,2 | 342,1 | 370,8 | 395,9 |
| Метилиодид                         | —                  | 203,1 | 214,3 | 223,6 | 233,7 | 248,6 | 261,2 | 275,2 | 296,1 | 314,2 |
| Метилкапроат                       | 273,8              | 293,8 | 298,2 | 310,2 | 323,1 | 341,9 | 357,6 | 374,9 | 400,5 | 422,3 |
| Метиллевулинат                     | 307,4              | 318,4 | 334,2 | 347,2 | 361,3 | 381,8 | 398,9 | 417,6 | 445,2 | 468,6 |
| Метилмеркаптан                     | 179,2              | 185,8 | 195,3 | 203,2 | 211,8 | 224,2 | 234,7 | 246,1 | 263,2 | 277,7 |
| Метилметакрилат                    | 237,4              | 246,3 | 259,3 | 270,0 | 281,6 | 298,6 | 312,9 | 328,6 | 352,0 | 372,0 |
| 2-Метилпентан                      | 208,6              | 216,5 | 228,1 | 237,7 | 248,2 | 263,5 | 276,4 | 290,6 | 311,8 | 330,0 |
| 3-Метилпентан                      | 210,0              | 218,0 | 229,7 | 239,5 | 250,0 | 265,6 | 278,6 | 293,1 | 314,6 | 333,1 |
| 2-Метил-1-пентанол                 | 283,4              | 292,9 | 306,5 | 317,7 | 329,6 | 346,9 | 361,3 | 376,9 | 399,6 | 418,8 |

| Вещество                         | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| 2-Метил-2-пентанол               | 264,1              | 273,0 | 285,7 | 296,2 | 307,4 | 323,6 | 337,0 | 351,6 | 373,0 | 391,0 |
| 2-Метил-4-пентанол               | 268,2              | 277,5 | 290,8 | 301,8 | 313,6 | 330,8 | 345,0 | 360,6 | 383,4 | 402,7 |
| 4-Метил-2-пентанол               | 267,6              | 276,3 | 288,7 | 298,8 | 309,7 | 325,4 | 338,3 | 352,3 | 372,7 | 389,7 |
| 2-Метилпропан                    | 160,7              | 167,1 | 176,3 | 184,1 | 192,5 | 204,8 | 215,3 | 226,9 | 244,3 | 259,4 |
| 2-Метилпропен                    | 162,9              | 169,4 | 179,0 | 187,0 | 195,7 | 208,6 | 219,6 | 231,7 | 250,0 | 265,9 |
| Метилпропиловый эфир             | 197,4              | 204,8 | 215,6 | 224,6 | 234,3 | 248,5 | 260,5 | 273,6 | 293,2 | 310,0 |
| Метилпропионат                   | 227,1              | 235,4 | 247,4 | 257,3 | 268,0 | 283,6 | 296,7 | 311,1 | 332,3 | 350,4 |
| 2-Метилпропионил-бромид          | 281,1              | 291,5 | 306,3 | 318,6 | 331,9 | 351,3 | 367,6 | 385,4 | 411,9 | 434,4 |
| Метилсалицилат                   | 320,5              | 332,1 | 348,7 | 362,5 | 377,4 | 399,0 | 417,1 | 437,0 | 466,3 | 491,2 |
| Метилсилан                       | 131,8              | 137,0 | 144,7 | 151,1 | 158,1 | 168,4 | 177,1 | 186,7 | 201,3 | 213,8 |
| 2-Метилтиофен                    | 241,0              | 250,3 | 263,7 | 274,9 | 287,0 | 304,9 | 319,9 | 336,5 | 361,3 | 382,6 |
| 2,3-Метилтиофен                  | 244,0              | 253,3 | 266,7 | 277,8 | 290,0 | 307,7 | 322,6 | 339,1 | 363,6 | 384,7 |
| Метилтиоцианат                   | 254,0              | 263,0 | 278,0 | 289,8 | 302,6 | 321,5 | 337,3 | 354,9 | 381,0 | 403,5 |
| Метилтрихлорсилан                | —                  | —     | 231,0 | 241,0 | 251,8 | 267,7 | 281,2 | 296,1 | 318,3 | 337,5 |
| Метилуретан                      | 294,5              | 304,6 | 319,2 | 331,2 | 344,2 | 362,9 | 378,5 | 395,5 | 420,5 | 441,5 |
| Метилформиат                     | 195,2              | 202,5 | 212,9 | 221,5 | 230,8 | 244,5 | 255,9 | 268,4 | 287,0 | 302,9 |
| Метилфторид                      | 122,9              | 127,5 | 134,1 | 139,7 | 145,7 | 154,4 | 161,8 | 169,9 | 182,0 | 192,3 |
| Метилхлорид                      | 265,0              | 274,3 | 287,5 | 298,4 | 310,2 | 327,3 | 341,5 | 357,0 | 379,7 | 399,0 |
| Метилхлорид                      | 159,8              | 165,5 | 173,8 | 180,6 | 188,0 | 198,7 | 207,7 | 217,5 | 232,0 | 244,3 |
| Метилциклогексан                 | 233,0              | 242,0 | 255,0 | 265,8 | 277,6 | 294,9 | 309,5 | 325,5 | 349,5 | 370,2 |
| Метилциклопентан                 | 215,7              | 224,0 | 236,0 | 246,0 | 256,8 | 272,6 | 286,0 | 300,7 | 322,7 | 341,6 |
| Метилциклопропан                 | 173,4              | 180,0 | 189,7 | 197,7 | 206,4 | 219,2 | 230,0 | 241,9 | 259,7 | 275,0 |
| 2-Метил-3-этилпентан             | 244,1              | 253,4 | 266,9 | 278,1 | 290,3 | 308,1 | 323,2 | 339,7 | 364,4 | 385,7 |
| 3-Метил-3-этилпентан             | 244,1              | 253,5 | 267,1 | 278,5 | 290,8 | 308,9 | 324,2 | 341,0 | 366,2 | 387,9 |
| 2-Метоксанилин                   | 328,8              | 340,1 | 356,1 | 369,3 | 383,6 | 404,1 | 421,2 | 439,8 | 467,1 | 490,0 |
| 2-Метоксифенол                   | 320,3              | 331,2 | 346,8 | 359,6 | 373,4 | 393,4 | 409,9 | 428,0 | 454,4 | 476,6 |
| 2-Метокснэтанол                  | 255,8              | 265,2 | 278,8 | 290,0 | 302,1 | 319,8 | 334,6 | 350,9 | 375,0 | 395,6 |
| Метоксусная кислота              | 320,4              | 331,3 | 346,9 | 359,7 | 373,5 | 393,5 | 410,1 | 428,1 | 454,5 | 476,7 |
| Муравьиная кислота               | 242,8              | 251,3 | 263,4 | 273,5 | 284,3 | 300,0 | 313,0 | 327,3 | 348,3 | 366,0 |
| 2-Нитроанилин                    | 371,0              | 383,8 | 402,3 | 417,4 | 433,8 | 457,6 | 477,2 | 498,7 | 530,3 | 557,0 |
| 3-Нитроанилин                    | 386,0              | 399,3 | 418,4 | 434,1 | 451,0 | 475,4 | 495,8 | 517,9 | 550,4 | 577,9 |
| 4-Нитроанилин                    | 410,0              | 423,9 | 443,9 | 460,2 | 477,9 | 503,4 | 524,6 | 547,6 | 581,3 | 609,7 |
| 2-Нитробензальдегид              | 352,8              | 365,7 | 384,3 | 399,6 | 416,2 | 440,5 | 460,7 | 483,0 | 515,9 | 543,9 |
| 3-Нитробензальдегид              | 362,9              | 375,7 | 394,1 | 409,2 | 425,5 | 449,2 | 469,0 | 490,5 | 522,3 | 549,2 |
| Нитробензол                      | 310,8              | 322,1 | 338,5 | 352,0 | 366,6 | 388,0 | 405,8 | 425,4 | 454,4 | 479,1 |
| Нитроглицерин                    | 393,3              | 409,4 | 432,8 | 452,5 | 473,9 | 505,7 | —     | —     | —     | —     |
| 4-Нитро-1,3-ксилол               | 332,2              | 344,4 | 361,9 | 376,5 | 392,2 | 415,1 | 434,3 | 455,4 | 486,6 | 513,2 |
| Нитрометан                       | 239,4              | 248,2 | 261,0 | 271,6 | 283,1 | 299,8 | 313,9 | 329,3 | 352,2 | 371,7 |
| 1-Нитропропан                    | 258,3              | 267,9 | 281,8 | 293,2 | 305,7 | 323,9 | 339,2 | 356,0 | 380,9 | 402,2 |
| 2-Нитропропан                    | 249,6              | 259,0 | 272,6 | 283,9 | 296,2 | 314,1 | 329,1 | 345,7 | 370,3 | 391,4 |
| 2-Нитротиофен                    | 315,5              | 327,4 | 344,7 | 359,0 | 374,6 | 397,4 | 416,5 | 437,6 | 469,0 | 495,9 |
| 2-Нитротолуол                    | 318,0              | 329,8 | 346,7 | 360,8 | 376,0 | 398,2 | 416,8 | 437,2 | 467,5 | 493,4 |
| 3-Нитротолуол                    | 318,2              | 330,4 | 348,1 | 362,8 | 378,7 | 402,1 | 421,9 | 443,6 | 476,1 | 504,0 |
| 4-Нитротолуол                    | 321,3              | 333,8 | 351,8 | 366,7 | 383,0 | 406,9 | 427,0 | 449,3 | 482,5 | 511,1 |
| 2-Нитрофенилацетат               | 368,2              | 379,6 | 395,8 | 409,0 | 423,1 | 443,4 | 460,0 | 478,0 | 503,9 | 525,5 |
| 2-Нитрофенол                     | 316,5              | 328,0 | 344,5 | 358,1 | 372,8 | 394,2 | 412,1 | 431,7 | 460,7 | 485,4 |
| Нитроэтан                        | 247,4              | 256,6 | 269,8 | 280,8 | 292,7 | 310,1 | 324,7 | 340,8 | 364,6 | 384,9 |
| 4-Оксибензальдегид               | 387,5              | 400,9 | 420,0 | 435,8 | 452,7 | 477,3 | 497,7 | 519,9 | 552,5 | 580,1 |
| $\alpha$ -Оксибутиронитрил       | 309,9              | 320,0 | 334,3 | 346,1 | 358,6 | 376,7 | 391,7 | 407,9 | 431,5 | 451,2 |
| $\alpha$ -Оксизомасляная кислота | 341,2              | 351,6 | 366,3 | 378,3 | 391,2 | 409,5 | 424,6 | 440,8 | 464,2 | 483,6 |
| 4-Окси-3-метил-2-бутанол         | 312,4              | 322,6 | 337,2 | 349,1 | 361,9 | 380,4 | 395,6 | 412,1 | 436,2 | 456,4 |
| 4-Окси-4-метил-2-пентанол        | 290,1              | 300,4 | 315,0 | 327,1 | 340,1 | 359,0 | 374,8 | 392,0 | 417,3 | 438,8 |
| 3-Оксипропионитрил               | 326,9              | 338,4 | 355,0 | 368,6 | 383,4 | 404,8 | 422,6 | 442,1 | 470,9 | 495,2 |
| Октаметилтрисилоксан             | 275,3              | 285,2 | 299,5 | 311,2 | 323,9 | 342,4 | 357,9 | 374,8 | 399,8 | 421,0 |
| Октаметилциклотетрасилоксан      | 289,7              | 300,1 | 315,0 | 327,2 | 340,5 | 359,8 | 375,9 | 393,5 | 419,4 | 441,5 |
| Октан                            | 253,5              | 262,9 | 276,5 | 287,8 | 300,0 | 317,9 | 332,9 | 349,3 | 373,7 | 394,6 |
| 1-Октанол                        | 320,1              | 330,4 | 345,0 | 356,9 | 369,6 | 388,0 | 403,1 | 419,5 | 443,3 | 463,1 |
| 2-Октанол                        | 300,8              | 311,1 | 325,9 | 338,0 | 351,2 | 370,1 | 385,9 | 403,0 | 428,2 | 449,5 |
| 2-Октанон                        | 290,9              | 301,3 | 316,3 | 328,7 | 342,1 | 361,6 | 377,8 | 395,6 | 421,9 | 444,3 |

| Вещество                   | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Параформальдегид           | 259,3              | 268,6 | 281,9 | 292,8 | 304,6 | 321,8 | 336,1 | 351,8 | 374,9 | 394,6 |
| 1,3-Пентадиен              | 197,0              | 204,6 | 215,6 | 224,7 | 234,7 | 249,2 | 261,5 | 275,1 | 295,3 | 312,7 |
| 1,4-Пентадиен              | 186,3              | 193,5 | 204,0 | 212,7 | 222,1 | 236,0 | 247,7 | 260,7 | 280,0 | 296,6 |
| Пентан                     | 191,8              | 199,3 | 210,2 | 219,2 | 229,1 | 243,5 | 255,7 | 269,2 | 289,4 | 306,8 |
| 2-Пентанол                 | 270,3              | 278,8 | 291,0 | 300,9 | 311,5 | 326,8 | 339,4 | 353,0 | 372,7 | 389,1 |
| 2-Пентанон                 | 256,9              | 265,3 | 277,2 | 286,9 | 297,3 | 312,3 | 324,7 | 338,1 | 357,7 | 374,1 |
| 3-Пентанон                 | 256,1              | 264,4 | 276,3 | 286,1 | 296,5 | 311,6 | 324,0 | 337,5 | 357,1 | 373,6 |
| 2, 3, 4-Пентатриол         | 424,0              | 436,9 | 455,3 | 470,3 | 486,3 | 509,2 | 528,0 | 548,2 | 577,5 | 601,8 |
| Пентахлорбензол            | 365,8              | 378,4 | 396,4 | 411,3 | 427,2 | 450,4 | 469,6 | 490,6 | 521,4 | 547,3 |
| Пентахлорфенол             | —                  | —     | —     | 441,8 | 458,4 | 482,5 | 502,5 | 524,1 | 555,9 | 582,5 |
| Пентахлорэтан              | 268,8              | 279,4 | 294,7 | 307,5 | 321,4 | 341,9 | 359,2 | 378,3 | 407,0 | 431,7 |
| Пентахлорэтилбензол        | 363,4              | 377,1 | 397,0 | 413,4 | 431,3 | 457,5 | 479,5 | 503,7 | 539,7 | 570,6 |
| 1-Пентен                   | 188,7              | 196,0 | 206,6 | 215,4 | 225,0 | 239,1 | 251,0 | 264,1 | 283,7 | 300,6 |
| 2-Пиколлин                 | 257,9              | 267,4 | 281,2 | 292,6 | 304,9 | 322,9 | 338,0 | 354,6 | 379,2 | 400,3 |
| Пимелиновая кислота        | 430,7              | 444,0 | 462,9 | 478,3 | 494,7 | 518,3 | 537,6 | 558,5 | 588,7 | 613,8 |
| Пиперидин                  | —                  | 248,0 | 261,2 | 272,1 | 284,0 | 301,5 | 316,2 | 332,4 | 356,5 | 377,2 |
| Пиридин                    | 248,9              | 258,1 | 271,3 | 282,2 | 294,1 | 311,3 | 325,8 | 341,7 | 365,2 | 385,3 |
| Пировиноградный ангидрид   | 337,0              | 349,2 | 366,8 | 381,3 | 397,0 | 419,9 | 439,0 | 460,0 | 490,9 | 517,3 |
| Пиросаллил                 | —                  | 398,1 | 417,4 | 433,3 | 450,5 | 475,4 | 496,1 | 518,8 | 552,1 | 580,3 |
| Пирокатехин                | —                  | 353,3 | 370,7 | 384,9 | 400,3 | 422,7 | 441,4 | 461,8 | 491,8 | 517,3 |
| Пробковая кислота          | 439,3              | 452,4 | 470,9 | 486,0 | 502,1 | 525,1 | 543,9 | 564,1 | 593,2 | 617,3 |
| Пропан                     | 141,8              | 147,4 | 155,6 | 162,4 | 169,9 | 180,8 | 190,1 | 200,4 | 215,8 | 229,2 |
| 1,2-Пропандиол             | 313,8              | 324,1 | 338,9 | 351,0 | 363,9 | 382,6 | 398,1 | 414,9 | 439,4 | 459,9 |
| 1,3-Пропандиол             | 327,7              | 338,9 | 354,8 | 367,8 | 381,9 | 402,2 | 419,0 | 437,4 | 464,2 | 486,9 |
| 1-Пропанол                 | 254,3              | 262,5 | 274,2 | 283,7 | 294,0 | 308,7 | 320,9 | 334,1 | 353,3 | 369,3 |
| 2-Пропанол                 | 243,3              | 251,2 | 262,5 | 271,7 | 281,6 | 295,8 | 307,5 | 320,3 | 338,8 | 354,3 |
| Пропиламин                 | 204,9              | 212,5 | 223,5 | 232,6 | 242,5 | 256,9 | 269,0 | 282,3 | 302,1 | 318,9 |
| Пропилацетат               | 242,3              | 251,1 | 263,7 | 274,1 | 285,4 | 301,9 | 315,6 | 330,7 | 353,0 | 371,9 |
| Пропилбутират              | 266,3              | 276,2 | 290,4 | 302,2 | 314,9 | 333,5 | 349,2 | 366,3 | 391,7 | 413,5 |
| Пропилен                   | 137,8              | 143,3 | 151,4 | 158,1 | 165,4 | 176,3 | 185,5 | 195,6 | 211,0 | 224,3 |
| Пропилен окись             | 194,5              | 201,8 | 212,5 | 221,3 | 230,9 | 244,9 | 256,6 | 269,6 | 288,9 | 305,4 |
| Пропилизобутират           | 276,2              | 286,3 | 300,9 | 313,0 | 326,1 | 345,2 | 361,2 | 378,8 | 404,8 | 427,0 |
| Пропилкарбамат             | 320,3              | 330,7 | 345,5 | 357,6 | 370,6 | 389,3 | 404,8 | 421,5 | 445,9 | 466,2 |
| Пропиллеулинат             | 326,1              | 337,5 | 353,8 | 367,3 | 381,8 | 402,8 | 420,4 | 439,5 | 467,6 | 491,4 |
| Пропилмеркаптан            | 213,0              | 221,3 | 233,2 | 243,1 | 253,9 | 269,7 | 283,0 | 297,7 | 319,7 | 338,6 |
| Пропилпропионат            | 254,0              | 263,3 | 276,7 | 287,9 | 299,9 | 317,5 | 332,2 | 348,3 | 372,3 | 392,7 |
| Пропилформиат              | 226,0              | 234,4 | 246,5 | 256,6 | 267,5 | 283,5 | 296,9 | 311,6 | 333,5 | 352,2 |
| Пропилхлорглюкоксилат      | 277,1              | 286,7 | 300,4 | 311,7 | 323,9 | 341,5 | 356,1 | 372,1 | 395,6 | 415,4 |
| Пропионамид                | 333,5              | 344,3 | 359,8 | 372,5 | 386,1 | 405,7 | 421,9 | 439,4 | 465,0 | 486,4 |
| Пропионитрил               | 233,4              | 242,3 | 255,2 | 265,9 | 277,5 | 294,4 | 308,7 | 324,5 | 347,9 | 368,1 |
| Пропионовая кислота        | 273,5              | 283,1 | 296,8 | 308,2 | 320,4 | 338,1 | 352,9 | 369,0 | 392,7 | 412,7 |
| Пропионовый ангидрид       | 288,5              | 298,7 | 313,4 | 325,6 | 338,7 | 357,7 | 373,6 | 391,0 | 416,5 | 438,2 |
| Резорцин                   | 375,5              | 387,7 | 405,1 | 419,4 | 434,7 | 456,8 | 475,0 | 494,7 | 523,5 | 547,6 |
| Салициловая кислота        | 377,2              | 387,9 | 403,0 | 415,2 | 428,2 | 446,7 | 461,7 | 477,9 | 501,0 | 520,0 |
| Салициловый альдегид       | 300,5              | 311,7 | 327,8 | 341,2 | 355,7 | 376,8 | 394,6 | 414,1 | 443,0 | 467,8 |
| Селенофен                  | 228,9              | 238,6 | 252,6 | 264,4 | 277,3 | 296,5 | 312,9 | 331,2 | 358,9 | 383,2 |
| Сероселенуглерод           | 221,4              | 230,1 | 242,8 | 253,3 | 264,7 | 281,6 | 295,8 | 311,6 | 335,2 | 355,6 |
| Сероуглерод                | 196,3              | 204,1 | 215,4 | 224,9 | 235,2 | 250,3 | 263,2 | 277,4 | 298,8 | 317,2 |
| Синильная кислота          | 198,2              | 204,9 | 214,4 | 222,2 | 230,7 | 242,8 | 252,9 | 263,9 | 280,0 | 293,5 |
| Сукцинамид                 | 380,6              | 393,1 | 411,0 | 425,7 | 441,4 | 464,1 | 482,9 | 503,2 | 532,9 | 557,8 |
| Сукцинхлорид               | 306,9              | 317,7 | 333,2 | 346,0 | 359,7 | 379,7 | 396,4 | 414,6 | 441,4 | 464,0 |
| Стирол                     | 261,8              | 271,9 | 286,6 | 298,8 | 312,2 | 331,7 | 348,1 | 366,3 | 393,5 | 416,9 |
| 1, 1, 1, 2-Тетрабромэтан   | 326,0              | 336,4 | 351,3 | 363,4 | 376,4 | 395,1 | 410,5 | 427,2 | 451,5 | 471,7 |
| 1, 1, 2, 2-Тетрабромэтан   | 332,5              | 344,7 | 362,4 | 376,9 | 392,7 | 415,7 | 435,0 | 456,2 | 487,6 | 514,3 |
| Тетраметилбор              | 210,6              | 219,0 | 231,2 | 241,4 | 252,5 | 268,8 | 282,6 | 297,9 | 320,9 | 340,8 |
| 2, 2, 3, 3-Тетраметилбутан | 251,1              | 259,7 | 272,1 | 282,3 | 293,3 | 309,2 | 322,4 | 336,8 | 357,9 | 375,8 |
| Тетраметилолово            | 217,5              | 226,0 | 238,4 | 248,7 | 259,9 | 276,3 | 290,2 | 305,6 | 328,7 | 348,5 |
| Тетрамети.пиперазин        | 290,7              | 301,5 | 317,0 | 329,8 | 343,6 | 363,9 | 380,9 | 399,5 | 427,1 | 450,7 |
| Тетраметилсвинец           | 239,1              | 248,3 | 261,7 | 272,8 | 285,0 | 302,7 | 317,7 | 334,3 | 359,1 | 380,3 |
| Тетраметилсилан            | 185,5              | 192,8 | 203,3 | 212,1 | 221,7 | 235,8 | 247,7 | 260,9 | 280,7 | 297,7 |
| Тетранитрометан            | —                  | —     | 278,5 | 289,9 | 302,3 | 320,3 | 335,5 | 352,2 | 377,0 | 398,2 |
| Тетрахлорамин              | 340,6              | 348,2 | 358,7 | 367,1 | 375,9 | 388,2 | 398,1 | 408,4 | 423,0 | 434,8 |
| 1, 2, 3, 4-Тетрахлорбензол | 335,5              | 348,0 | 366,1 | 381,0 | 397,3 | 421,0 | 440,9 | 462,7 | 495,2 | 523,0 |

| Вещество                         | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| 1,2,3,5-Тетрахлорбензол          | 325,1              | 337,7 | 356,0 | 371,2 | 387,7 | 412,0 | 432,5 | 455,2 | 489,1 | 518,2 |
| 1,2,4,5-Тетрахлорбензол          | —                  | —     | —     | —     | 394,1 | 417,5 | 437,1 | 458,7 | 490,8 | 518,2 |
| 1,1,2,2-Тетрахлор-1,2-дифторэтан | 231,5              | 240,3 | 253,0 | 263,5 | 274,9 | 291,7 | 305,8 | 321,3 | 344,4 | 364,2 |
| 3,4,5,6-Тетрахлор-1,2-ксилол     | 361,2              | 373,8 | 391,9 | 406,8 | 422,9 | 446,2 | 465,6 | 486,7 | 517,9 | 544,2 |
| Тетрахлорсилан                   | —                  | —     | 223,7 | 233,5 | 244,2 | 259,9 | 273,2 | 287,9 | 310,0 | 329,1 |
| 2-α, α, α-Тетрахлортолуол        | 336,8              | 349,8 | 368,8 | 384,5 | 401,6 | 426,7 | 447,9 | 471,3 | 506,3 | 536,5 |
| 2,3,4,6-Тетрахлорфенол           | 367,1              | 379,6 | 397,5 | 412,2 | 428,0 | 450,9 | 469,9 | 490,6 | 520,8 | 546,4 |
| 1,1,1,2-Тетрахлорэтан            | 251,9              | 261,6 | 275,8 | 287,5 | 300,3 | 319,0 | 334,8 | 352,2 | 378,3 | 400,7 |
| 1,1,2,2-Тетрахлорэтан            | 264,0              | 274,0 | 288,6 | 300,7 | 313,9 | 333,2 | 349,4 | 367,3 | 393,9 | 416,8 |
| 1,2,3,5-Тетрахлор-4-этилбензол   | 344,7              | 357,8 | 376,6 | 392,3 | 409,3 | 434,2 | 455,2 | 478,3 | 512,6 | 542,1 |
| Тетрахлорэтилен                  | 248,0              | 257,5 | 271,1 | 282,5 | 294,8 | 312,9 | 328,1 | 344,9 | 369,9 | 391,3 |
| Тетраэтилдистибин                | 363,4              | 377,9 | 399,1 | 416,8 | 436,1 | 464,5 | 488,6 | 515,3 | 555,5 | 590,3 |
| Тетраэтиленгликоль               | 421,8              | 433,7 | 450,5 | 464,1 | 478,5 | 499,0 | 515,7 | 533,6 | 559,3 | 580,4 |
| Тетраэтиленгликольхлоргидрин     | 378,1              | 390,5 | 408,3 | 422,8 | 438,4 | 460,9 | 479,6 | 499,8 | 529,2 | 553,9 |
| Тетраэтилсвинец                  | 305,8              | 316,1 | 330,8 | 342,9 | 355,9 | 374,7 | 390,3 | 407,3 | 432,1 | 453,0 |
| Тетраэтилсилан                   | 266,8              | 277,1 | 292,0 | 304,4 | 317,8 | 337,6 | 354,2 | 372,6 | 400,0 | 423,6 |
| Тетраэтоксисилан                 | 282,8              | 293,2 | 308,2 | 320,7 | 334,1 | 353,8 | 370,3 | 388,4 | 415,2 | 438,1 |
| Тиглиновый альдегид              | 243,9              | 253,3 | 267,0 | 278,4 | 290,7 | 308,9 | 324,2 | 341,1 | 366,4 | 388,1 |
| 2,2-Тиодизтанол                  | 305,9              | 326,8 | 359,1 | 388,2 | 422,5 | 478,2 | 531,2 | —     | —     | —     |
| Тиофен                           | 227,4              | 235,9 | 248,0 | 258,1 | 269,1 | 285,0 | 298,4 | 313,2 | 335,0 | 353,7 |
| 4-Толилгидразин                  | 292,6              | 303,4 | 319,0 | 331,9 | 345,9 | 366,3 | 383,4 | 402,2 | 430,1 | 453,9 |
| 2-Толлизозианид                  | 310,5              | 321,3 | 336,9 | 349,7 | 363,5 | 383,6 | 400,3 | 418,5 | 445,3 | 468,0 |
| 2-Толуидин                       | 308,7              | 320,0 | 336,2 | 349,6 | 364,1 | 385,2 | 402,9 | 422,2 | 450,9 | 475,3 |
| 3-Толуидин                       | 309,5              | 320,5 | 336,3 | 349,4 | 363,4 | 383,9 | 401,0 | 419,6 | 447,1 | 470,5 |
| 4-Толуидин                       | 304,2              | 315,6 | 332,1 | 345,7 | 360,6 | 382,2 | 400,4 | 420,5 | 450,2 | 475,7 |
| 4-Толунитрил                     | 309,4              | 321,2 | 338,2 | 352,4 | 367,8 | 390,3 | 409,2 | 430,1 | 461,3 | 488,0 |
| Толуол                           | 241,5              | 250,6 | 263,9 | 274,9 | 286,9 | 304,4 | 319,1 | 335,3 | 359,5 | 380,2 |
| Толуол-2,4-диамин                | 373,4              | 385,9 | 403,7 | 418,4 | 434,2 | 457,0 | 475,8 | 496,3 | 526,3 | 551,5 |
| Трибромацетальдегид              | 286,7              | 297,4 | 312,7 | 325,4 | 339,2 | 359,3 | 376,2 | 394,7 | 422,2 | 445,7 |
| 1,1,2-Трибромбутан               | 312,3              | 324,0 | 340,8 | 354,8 | 370,0 | 392,2 | 410,8 | 431,3 | 461,7 | 487,7 |
| 1,2,2-Трибромбутан               | 308,2              | 319,8 | 336,7 | 350,6 | 365,8 | 388,0 | 406,6 | 427,1 | 457,7 | 483,9 |
| 2,2,3-Трибромбутан               | 305,6              | 317,0 | 333,5 | 347,2 | 362,0 | 383,7 | 401,8 | 421,8 | 451,5 | 476,9 |
| Трибромметан                     | —                  | 274,4 | 289,3 | 301,8 | 315,3 | 335,2 | 352,0 | 370,6 | 398,4 | 422,3 |
| 1,2,3-Трибромпропан              | 314,2              | 326,0 | 343,0 | 357,0 | 372,3 | 394,7 | 413,4 | 434,1 | 464,8 | 491,0 |
| 1,1,2-Трибромэтан                | 299,3              | 310,1 | 325,7 | 338,5 | 352,4 | 372,6 | 389,5 | 408,0 | 435,3 | 458,5 |
| Триметиламин                     | 172,5              | 179,1 | 188,8 | 196,8 | 205,5 | 218,3 | 229,1 | 241,0 | 258,7 | 274,0 |
| Триметилбор                      | 153,7              | 160,0 | 169,2 | 176,9 | 185,3 | 197,7 | 208,2 | 220,0 | 237,7 | 253,1 |
| 2,2,3-Триметилбутан              | —                  | —     | 238,4 | 248,9 | 260,4 | 277,3 | 291,7 | 307,6 | 331,4 | 352,1 |
| Триметилгаллий                   | 208,1              | 216,0 | 227,6 | 237,1 | 247,5 | 262,7 | 275,6 | 289,7 | 310,8 | 328,9 |
| Триметилдиборан                  | 196,1              | 203,9 | 215,3 | 224,8 | 235,2 | 250,4 | 263,3 | 277,7 | 299,2 | 317,8 |
| 2,2,3-Триметилпентан             | 239,0              | 248,2 | 261,6 | 272,7 | 284,7 | 302,4 | 317,3 | 333,8 | 358,4 | 379,5 |
| 2,2,4-Триметилпентан             | 232,0              | 241,0 | 253,9 | 264,7 | 276,5 | 293,7 | 308,2 | 324,3 | 348,2 | 368,8 |
| 2,3,4-Триметилпентан             | 241,9              | 251,2 | 264,6 | 275,7 | 287,9 | 305,7 | 320,6 | 337,2 | 361,8 | 383,0 |
| 2,2,4-Триметил-2-пентанон        | 283,0              | 291,9 | 304,5 | 314,9 | 325,9 | 341,8 | 354,8 | 368,9 | 389,4 | 406,4 |
| Триметилпропилолово              | 255,1              | 264,7 | 278,7 | 290,2 | 302,8 | 321,1 | 336,6 | 353,6 | 378,9 | 400,6 |
| Триметилпропилсилан              | 222,7              | 231,6 | 244,5 | 255,2 | 266,9 | 284,2 | 298,8 | 315,0 | 339,3 | 360,3 |
| Триметилфосфат                   | 294,0              | 305,2 | 321,4 | 334,9 | 349,6 | 371,0 | 389,1 | 409,0 | 438,6 | 464,1 |
| Триметилхлорсилан                | —                  | —     | 223,7 | 233,5 | 244,2 | 260,0 | 273,3 | 288,1 | 310,3 | 329,5 |
| Триметилантарный ангидрид        | 320,2              | 332,3 | 349,7 | 364,1 | 379,8 | 402,7 | 422,0 | 443,2 | 474,7 | 501,7 |
| α, α, α-Трифтортолуол            | 236,5              | 245,5 | 258,4 | 269,2 | 280,9 | 298,1 | 312,5 | 328,4 | 352,1 | 372,5 |
| Трифторфенилсилан                | 237,6              | 246,4 | 259,1 | 269,6 | 280,9 | 297,5 | 311,4 | 326,6 | 349,3 | 368,6 |
| 2,4,6-Трихлоранилин              | 401,9              | 412,2 | 426,5 | 438,1 | 450,3 | 467,5 | 481,4 | 496,1 | 517,1 | 534,1 |
| Трихлорацетальдегид              | 231,2              | 240,1 | 253,1 | 263,9 | 275,7 | 292,9 | 307,4 | 323,5 | 347,5 | 368,1 |
| Трихлорацетилбромид              | 260,5              | 270,5 | 285,1 | 297,1 | 310,2 | 329,4 | 345,6 | 363,5 | 390,1 | 413,1 |
| 1,2,3-Трихлорбензол              | 308,2              | 320,2 | 337,5 | 351,9 | 367,6 | 390,6 | 410,0 | 431,5 | 463,6 | 491,2 |
| 1,2,4-Трихлорбензол              | 305,6              | 317,4 | 334,3 | 348,4 | 363,8 | 386,2 | 405,1 | 426,0 | 457,2 | 483,9 |
| 1,3,5-Трихлорбензол              | —                  | 313,4 | 330,3 | 344,3 | 359,6 | 382,0 | 400,9 | 421,8 | 453,0 | 479,8 |
| 1,2,3-Трихлорбутан               | 268,0              | 278,9 | 294,7 | 308,0 | 322,5 | 343,8 | 362,0 | 382,2 | 412,6 | 439,0 |

| Вещество                                      | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                               | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Трихлоризопропилсилан                         | 244,1              | 253,6 | 267,2 | 278,5 | 290,9 | 309,0 | 324,2 | 341,0 | 366,2 | 387,8 |
| Трихлорметан                                  | 210,9              | 218,9 | 230,4 | 240,0 | 250,4 | 265,5 | 278,3 | 292,3 | 313,2 | 331,1 |
| Трихлорметилсилан                             | 208,8              | 217,1 | 229,1 | 239,1 | 250,0 | 266,0 | 279,6 | 294,7 | 317,2 | 336,7 |
| 1,1,1-Трихлорпропан                           | 239,8              | 248,9 | 262,1 | 273,1 | 285,0 | 302,4 | 317,1 | 333,3 | 357,4 | 378,0 |
| 1,2,3-Трихлорпропан                           | 276,8              | 287,0 | 301,7 | 313,9 | 327,1 | 346,4 | 362,6 | 380,3 | 406,7 | 429,1 |
| Трихлорсилан                                  | —                  | —     | 206,9 | 215,9 | 225,7 | 240,1 | 252,3 | 265,8 | 286,0 | 303,5 |
| $\alpha$ , $\alpha$ , $\alpha$ -Трихлортолуол | 312,6              | 324,1 | 340,7 | 354,5 | 369,4 | 391,2 | 409,4 | 429,4 | 459,1 | 484,4 |
| 1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан               | 201,3              | 209,0 | 220,2 | 229,4 | 239,5 | 254,3 | 266,7 | 280,4 | 300,9 | 318,4 |
| Трихлоруксусная кислота                       | 318,7              | 329,2 | 344,1 | 356,3 | 369,5 | 388,4 | 404,0 | 421,0 | 445,7 | 466,4 |
| Трихлоруксусный ангидрид                      | 324,0              | 335,7 | 352,4 | 366,1 | 381,0 | 402,7 | 420,8 | 440,6 | 469,9 | 494,7 |
| Трихлорфенилсилан                             | 300,3              | 311,6 | 328,0 | 341,5 | 356,2 | 377,7 | 395,8 | 415,7 | 445,4 | 470,7 |
| 2,4,5-Трихлорфенол                            | 340,0              | 352,2 | 369,7 | 384,2 | 399,9 | 422,6 | 441,6 | 462,5 | 493,2 | 519,3 |
| 2,4,6-Трихлорфенол                            | 185,0              | 192,2 | 202,5 | 211,1 | 220,5 | 234,3 | 245,9 | 258,7 | 277,8 | 294,2 |
| Трихлорфторметан                              | 216,7              | 225,0 | 237,1 | 247,2 | 258,2 | 274,2 | 287,8 | 302,7 | 325,0 | 344,2 |
| 1,1,1-Трихлорэтан                             | 243,9              | 253,1 | 266,6 | 277,7 | 289,8 | 307,5 | 322,4 | 338,9 | 363,4 | 384,4 |
| 1,1,2-Трихлорэтан                             | 225,5              | 234,1 | 246,6 | 257,0 | 268,3 | 284,9 | 298,9 | 314,3 | 337,2 | 357,0 |
| Трихлорэтилен                                 | 240,8              | 249,6 | 262,1 | 272,5 | 283,8 | 300,2 | 313,9 | 328,9 | 351,1 | 369,9 |
| Трихлорэтилсилан                              | 236,3              | 245,3 | 258,3 | 269,1 | 280,8 | 298,0 | 312,4 | 328,4 | 352,1 | 372,4 |
| Трихлорэтоксилан                              | —                  | —     | 113,0 | 120,3 | 128,7 | 141,8 | 153,5 | 167,5 | 190,2 | 212,0 |
| Триэтиленбор                                  | 382,0              | 394,2 | 411,4 | 425,5 | 440,5 | 462,2 | 480,0 | 499,3 | 527,3 | 550,6 |
| Триэтиленгликоль                              | 249,8              | 259,4 | 273,4 | 285,1 | 297,7 | 316,3 | 332,0 | 349,3 | 375,2 | 397,4 |
| Триэтилметилсилан                             | 275,9              | 287,5 | 304,4 | 318,6 | 334,2 | 357,3 | 377,0 | 398,9 | 432,3 | 461,5 |
| Триэтилформиат                                | 273,3              | 283,1 | 297,2 | 308,8 | 321,3 | 339,6 | 354,8 | 371,5 | 396,1 | 417,0 |
| Триэтилфосфат                                 | 306,7              | 318,3 | 335,2 | 349,3 | 364,5 | 386,9 | 405,6 | 426,4 | 457,2 | 483,7 |
| Триэтоксиметилсилан                           | 338,0              | 349,6 | 366,1 | 379,7 | 394,3 | 415,5 | 433,1 | 452,3 | 480,4 | 504,0 |
| Углерода диоксид                              | 135,8              | 140,1 | 146,1 | 151,0 | 156,3 | 163,8 | 170,0 | 176,7 | 186,4 | 194,5 |
| Углерода диоксид                              | 173,9              | 180,7 | 190,6 | 198,8 | 207,7 | 220,9 | 232,0 | 244,3 | 262,7 | 278,6 |
| Углерода оксид                                | 49,9               | 51,8  | 54,7  | 57,1  | 59,7  | 63,5  | 66,8  | 70,4  | 75,7  | 80,4  |
| Углерода серооксид                            | 138,0              | 143,4 | 151,2 | 157,7 | 164,8 | 175,2 | 184,0 | 193,7 | 208,3 | 220,8 |
| Углерод подсернистый                          | 282,4              | 293,2 | 308,9 | 322,0 | 336,2 | 357,0 | 374,5 | 393,9 | —     | —     |
| Углерод четырехбромистый                      | —                  | —     | —     | —     | 345,3 | 366,8 | 384,8 | 404,7 | 434,5 | 460,0 |
| Углерод четырехфтористый                      | 88,3               | 91,9  | 97,3  | 101,7 | 106,7 | 113,9 | 120,1 | 127,0 | 137,4 | 146,6 |
| Углерод четыреххлористый                      | 218,8              | 227,3 | 239,5 | 249,6 | 260,6 | 276,8 | 290,4 | 305,4 | 327,8 | 347,1 |
| Уксусная кислота                              | 252,0              | 261,2 | 274,6 | 285,7 | 297,7 | 315,2 | 329,8 | 345,9 | 369,8 | 390,1 |
| Уксусный ангидрид                             | 270,1              | 279,6 | 293,3 | 304,7 | 316,9 | 334,6 | 349,4 | 365,6 | 389,4 | 409,6 |
| Уретан                                        | —                  | 318,8 | 333,6 | 345,7 | 358,7 | 377,5 | 393,1 | 410,1 | 434,9 | 455,7 |
| 2-Фенетидин                                   | 334,2              | 345,7 | 362,1 | 375,7 | 390,3 | 411,4 | 429,0 | 448,2 | 476,3 | 500,0 |
| Фенетиловый спирт                             | 325,7              | 337,1 | 353,4 | 366,9 | 381,4 | 402,5 | 420,0 | 439,1 | 467,3 | 491,1 |
| Фенетол                                       | 285,7              | 296,3 | 311,5 | 324,1 | 337,8 | 357,8 | 374,5 | 392,9 | 420,1 | 443,3 |
| Фенилацетат                                   | 305,8              | 316,7 | 332,5 | 345,5 | 359,6 | 380,0 | 397,1 | 415,8 | 443,3 | 466,8 |
| Фенилацетохлорид                              | 315,5              | 326,7 | 342,9 | 356,2 | 370,6 | 391,6 | 409,0 | 428,1 | 456,3 | 480,2 |
| Фенилацетонитрил                              | 327,3              | 339,2 | 356,4 | 370,5 | 385,9 | 408,3 | 427,0 | 447,6 | 478,0 | 503,9 |
| Фенилгидразин                                 | 339,3              | 351,2 | 368,4 | 382,6 | 397,9 | 420,1 | 438,6 | 458,8 | 488,5 | 513,7 |
| 1,3-Фенилдиамин                               | 366,6              | 379,6 | 398,2 | 413,6 | 430,1 | 454,2 | 474,3 | 496,2 | 528,5 | 555,9 |
| Фенилдихлорфосфат                             | 333,4              | 345,4 | 362,6 | 376,8 | 392,2 | 414,6 | 433,3 | 453,8 | 484,0 | 509,7 |
| Фенилизотиоцианат                             | 315,1              | 326,9 | 343,8 | 357,8 | 373,0 | 395,2 | 413,8 | 434,3 | 464,7 | 490,7 |
| Фенилизотиоцианат                             | 278,0              | 288,5 | 303,6 | 316,2 | 329,8 | 349,7 | 366,5 | 384,9 | 412,3 | 435,7 |
| Фенилизотианид                                | 279,8              | 290,1 | 305,1 | 317,5 | 331,0 | 350,6 | 367,1 | 385,2 | 412,1 | 435,0 |
| Фенилмеркаптан                                | 286,1              | 296,4 | 311,3 | 323,6 | 337,0 | 356,3 | 372,6 | 390,3 | 416,5 | 438,9 |
| Фенилтрихлорсилан                             | —                  | —     | 327,7 | 341,4 | 356,2 | 377,8 | 396,0 | 416,1 | 446,0 | 471,6 |
| Фенилуксусная кислота                         | 364,5              | 376,6 | 394,0 | 408,2 | 423,4 | 445,5 | 463,7 | 483,5 | 512,5 | 536,8 |
| 2-Феноксэтанол                                | 345,2              | 357,1 | 374,0 | 387,9 | 402,9 | 424,6 | 442,6 | 462,2 | 491,0 | 515,2 |
| Фенол                                         | 306,0              | 316,1 | 330,6 | 342,4 | 355,1 | 373,5 | 388,7 | 405,2 | 429,2 | 449,4 |
| Формальдегид                                  | —                  | —     | 174,7 | 182,1 | 190,1 | 201,9 | 211,8 | 222,8 | 239,1 | 253,2 |
| Формамид                                      | 339,1              | 349,6 | 364,5 | 376,7 | 389,7 | 408,4 | 423,8 | 440,3 | 464,3 | 484,3 |
| Фосген                                        | 176,8              | 183,6 | 193,3 | 201,4 | 210,2 | 223,0 | 233,8 | 245,8 | 263,5 | 278,8 |
| Фталевый ангидрид                             | 357,1              | 370,2 | 389,0 | 404,6 | 421,5 | 446,2 | 466,8 | 489,4 | 523,0 | 551,5 |
| Фталид                                        | 361,7              | 375,0 | 394,3 | 410,2 | 427,5 | 452,7 | 473,8 | 497,0 | 531,4 | 560,7 |

| Вещество                                 | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                          | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Фталилхлорид                             | 353,2              | 366,2 | 384,9 | 400,4 | 417,3 | 441,8 | 462,3 | 484,9 | 518,3 | 546,8 |
| Фторбензол                               | 225,6              | 234,2 | 246,6 | 256,8 | 268,0 | 284,3 | 298,0 | 313,2 | 335,7 | 355,0 |
| 2-Фтортолуол                             | 243,9              | 253,2 | 266,6 | 277,7 | 289,8 | 307,4 | 322,3 | 338,7 | 363,1 | 384,0 |
| 3-Фтортолуол                             | 246,0              | 255,3 | 268,7 | 279,9 | 292,0 | 309,7 | 324,6 | 341,0 | 365,3 | 386,2 |
| 4-Фтортолуол                             | 246,7              | 256,0 | 269,4 | 280,6 | 292,7 | 310,5 | 325,4 | 341,8 | 366,2 | 387,2 |
| 1-Фторэтилен                             | 120,8              | 125,8 | 133,0 | 139,1 | 145,7 | 155,5 | 163,9 | 173,2 | 187,2 | 199,4 |
| транс-Фумарилхлорид                      | 282,7              | 292,8 | 307,4 | 319,5 | 332,6 | 351,5 | 367,4 | 384,8 | 410,4 | 432,2 |
| Фуфурилловый спирт                       | 300,5              | 310,5 | 324,8 | 336,5 | 349,1 | 367,2 | 382,2 | 398,5 | 422,3 | 442,3 |
| Фуфурол                                  | 286,0              | 296,1 | 310,6 | 322,5 | 335,4 | 354,1 | 369,7 | 386,7 | 411,8 | 433,0 |
| Хлоральгидрат                            | 260,0              | 268,0 | 279,2 | 288,3 | 298,0 | 312,0 | 323,4 | 335,8 | 353,6 | 368,3 |
| 2-Хлоранилин                             | 312,2              | 323,4 | 339,5 | 352,8 | 367,2 | 388,2 | 405,6 | 424,8 | 453,0 | 477,0 |
| 4-Хлоранилин                             | 326,1              | 338,0 | 355,0 | 369,1 | 384,4 | 406,6 | 425,2 | 445,6 | 475,7 | 501,3 |
| Хлорбензол                               | 254,9              | 264,7 | 278,7 | 290,4 | 303,1 | 321,7 | 337,3 | 354,5 | 380,2 | 402,3 |
| 1-Хлорбутан                              | 219,6              | 228,1 | 240,4 | 250,6 | 261,7 | 278,0 | 291,8 | 306,9 | 329,6 | 349,1 |
| Хлордиметилфенилсилан                    | 296,7              | 307,8 | 323,9 | 337,2 | 351,7 | 372,8 | 390,6 | 410,1 | 439,2 | 464,1 |
| Хлордиформетан                           | 147,5              | 153,0 | 161,0 | 167,6 | 174,7 | 185,2 | 194,0 | 203,6 | 217,9 | 230,2 |
| α-Хлоркотоновая кислота                  | 338,3              | 348,8 | 363,7 | 375,9 | 388,9 | 407,5 | 422,8 | 439,3 | 463,2 | 483,1 |
| Хлорметилсилан                           | 174,2              | 181,0 | 191,0 | 199,2 | 208,2 | 221,5 | 232,7 | 245,0 | 263,6 | 279,6 |
| Хлорпикрин                               | 243,1              | 252,3 | 265,6 | 276,7 | 288,7 | 306,3 | 321,1 | 337,4 | 361,6 | 382,4 |
| 2-Хлорпиридин                            | 280,4              | 291,1 | 306,4 | 319,2 | 333,0 | 353,3 | 370,4 | 389,1 | 417,1 | 441,1 |
| 1-Хлорпропан                             | 200,8              | 208,4 | 219,5 | 228,7 | 238,7 | 253,3 | 265,6 | 279,2 | 299,4 | 316,7 |
| 2-Хлорпропан                             | 190,5              | 198,0 | 208,9 | 218,0 | 227,8 | 242,4 | 254,7 | 268,3 | 288,7 | 306,4 |
| 1-Хлорпропилен                           | 187,6              | 195,3 | 206,3 | 215,6 | 225,7 | 240,6 | 253,3 | 267,4 | 288,6 | 307,0 |
| 3-Хлорпропилен                           | 198,8              | 206,5 | 217,5 | 226,7 | 236,7 | 251,4 | 263,7 | 277,4 | 297,7 | 315,2 |
| γ-Хлорпропилтрихлор-<br>силан            | —                  | —     | 315,4 | 328,4 | 342,6 | 363,4 | 380,9 | 400,1 | 428,7 | 453,3 |
| 3-Хлорстирол                             | 292,3              | 303,4 | 319,5 | 332,8 | 347,3 | 368,6 | 386,5 | 406,2 | 435,5 | 460,7 |
| 4-Хлорстирол                             | 295,1              | 306,1 | 322,0 | 335,3 | 349,6 | 370,5 | 388,1 | 407,5 | 436,2 | 460,8 |
| α-Хлортолуол                             | 289,8              | 300,6 | 316,0 | 328,8 | 342,6 | 362,8 | 379,8 | 398,4 | 426,0 | 449,6 |
| 2-Хлортолуол                             | 272,9              | 283,3 | 298,3 | 310,8 | 324,4 | 344,2 | 360,9 | 379,4 | 406,8 | 430,4 |
| 3-Хлортолуол                             | 272,8              | 283,3 | 298,6 | 311,2 | 325,0 | 345,3 | 362,3 | 381,2 | 409,3 | 433,5 |
| 4-Хлортолуол                             | 273,7              | 284,2 | 299,5 | 312,1 | 325,8 | 346,0 | 362,9 | 381,6 | 409,5 | 433,5 |
| Хлортриметилсилан                        | 206,3              | 214,3 | 225,8 | 235,4 | 245,9 | 261,3 | 274,2 | 288,6 | 310,0 | 328,4 |
| Хлортрифторметан                         | 121,0              | 125,5 | 132,1 | 137,5 | 143,4 | 152,1 | 159,4 | 167,4 | 179,3 | 189,4 |
| 2-Хлор-α, α, α-трифторто-<br>луол        | 267,7              | 277,9 | 292,7 | 305,0 | 318,4 | 338,0 | 354,5 | 372,7 | 399,9 | 423,2 |
| 1-Хлор-1,2,2-трифторэти-<br>лен          | 153,7              | 159,5 | 168,0 | 175,1 | 182,8 | 194,0 | 203,4 | 213,9 | 229,4 | 242,7 |
| Хлортриэтилсилан                         | 263,3              | 273,4 | 288,0 | 300,1 | 313,3 | 332,6 | 348,9 | 366,8 | 393,6 | 416,6 |
| Хлоруксусная кислота                     | 311,0              | 321,5 | 336,5 | 348,8 | 362,1 | 381,2 | 397,1 | 414,4 | 439,6 | 460,9 |
| Хлоруксусный ангидрид                    | 335,9              | 346,9 | 362,5 | 375,3 | 389,1 | 408,9 | 425,3 | 443,1 | 468,9 | 490,6 |
| 4-Хлорфенетиловый спирт                  | 351,4              | 363,7 | 381,3 | 395,9 | 411,6 | 434,3 | 453,3 | 473,9 | 504,3 | 530,1 |
| 2-Хлорфенол                              | 279,6              | 290,4 | 306,1 | 319,1 | 333,3 | 354,2 | 371,7 | 391,1 | 420,1 | 445,0 |
| 3-Хлорфенол                              | 311,5              | 323,1 | 339,8 | 353,6 | 368,5 | 390,4 | 408,8 | 428,9 | 458,8 | 484,4 |
| 4-Хлорфенол                              | 317,3              | 329,0 | 345,9 | 359,8 | 375,0 | 397,0 | 415,5 | 435,8 | 465,9 | 491,6 |
| бис-2-Хлорэтилацеталь                    | 324,3              | 335,4 | 351,4 | 364,5 | 378,6 | 399,1 | 416,1 | 434,6 | 461,8 | 484,7 |
| 1-Хлор-2-этилбензол                      | 284,6              | 295,4 | 311,0 | 323,9 | 337,9 | 358,5 | 375,7 | 394,8 | 423,1 | 447,4 |
| 1-Хлор-3-этилбензол                      | 286,0              | 297,0 | 312,8 | 325,9 | 340,1 | 361,0 | 378,6 | 398,0 | 426,9 | 451,7 |
| 1-Хлор-4-этилбензол                      | 287,0              | 298,1 | 314,1 | 327,5 | 342,0 | 363,3 | 381,2 | 401,0 | 430,6 | 456,0 |
| 1-Хлорэтилен                             | 164,1              | 170,3 | 179,2 | 186,6 | 194,7 | 206,4 | 216,3 | 227,2 | 243,4 | 257,3 |
| 2-Хлорэтилхлорацетат                     | 313,3              | 324,4 | 340,4 | 353,6 | 367,8 | 388,5 | 405,7 | 424,6 | 452,4 | 475,9 |
| 2-Хлорэтил-2-хлоризо-<br>пропиловый эфир | 292,3              | 303,0 | 318,4 | 331,1 | 344,8 | 364,9 | 381,6 | 400,0 | 427,2 | 450,4 |
| 2-Хлорэтил-2-хлорпропи-<br>ловый эфир    | 297,3              | 308,4 | 324,5 | 337,8 | 352,3 | 373,4 | 391,1 | 410,6 | 439,6 | 464,4 |
| 1-Хлор-2-этоксibenзол                    | 313,1              | 324,4 | 340,6 | 354,1 | 368,6 | 389,7 | 407,3 | 426,7 | 455,2 | 479,5 |
| 2-(2-Хлорэтокси)-этанол                  | 321,1              | 331,5 | 346,3 | 358,5 | 371,5 | 390,3 | 405,8 | 422,6 | 447,0 | 467,5 |
| Циан бромистый                           | 234,1              | 241,2 | 251,4 | 259,7 | 268,5 | 281,1 | 291,5 | 302,6 | 318,8 | 332,2 |
| Циан иодистый                            | 294,6              | 303,4 | 315,8 | 325,9 | 336,7 | 352,1 | 364,7 | 378,3 | 397,8 | 413,9 |
| 2-Циано-2-бутилацетат                    | 310,4              | 321,2 | 336,7 | 349,4 | 363,2 | 383,1 | 399,8 | 417,9 | 444,5 | 467,0 |
| Циан фтористый                           | 137,1              | 141,5 | 147,9 | 153,2 | 158,8 | 166,9 | 173,6 | 180,8 | 191,4 | 200,2 |
| Циан хлористый                           | 193,1              | 199,5 | 208,6 | 216,0 | 224,0 | 235,5 | 245,0 | 255,4 | 270,4 | 283,1 |
| Циклобутан                               | 177,0              | 183,9 | 194,0 | 202,3 | 211,4 | 224,8 | 236,1 | 248,7 | 267,4 | 283,5 |

| гво                             | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Циклобутен                      | 170,4              | 177,2 | 186,9 | 195,0 | 203,8 | 216,8 | 227,8 | 240,0 | 258,2 | 273,9 |
| Циклогексан                     | 222,9              | 231,4 | 243,5 | 253,6 | 264,5 | 280,6 | 294,0 | 308,8 | 330,9 | 349,8 |
| Циклогексанол                   | 288,7              | 298,7 | 312,9 | 324,7 | 337,3 | 355,6 | 370,8 | 387,4 | 411,7 | 432,2 |
| Циклогексанон                   | 268,7              | 279,1 | 294,0 | 306,4 | 319,9 | 339,7 | 356,4 | 374,8 | 402,3 | 425,9 |
| Циклогексанэтанол               | 318,0              | 329,0 | 344,7 | 357,6 | 371,5 | 391,6 | 408,4 | 426,6 | 453,3 | 475,9 |
| Циклопентан                     | 201,1              | 208,9 | 220,1 | 229,5 | 239,6 | 254,6 | 267,2 | 281,1 | 301,8 | 319,7 |
| Циклопропан                     | 153,1              | 158,8 | 166,9 | 173,6 | 180,8 | 191,4 | 200,3 | 210,1 | 224,5 | 236,8 |
| Цитраконовый ангидрид           | 314,2              | 325,7 | 342,2 | 355,8 | 370,6 | 392,1 | 410,2 | 429,9 | 459,2 | 484,1 |
| Энантлхлорид                    | 302,9              | 311,5 | 323,5 | 333,3 | 343,7 | 358,4 | 370,4 | 383,3 | 401,7 | 416,9 |
| Энантовая кислота               | 343,7              | 354,3 | 369,3 | 381,4 | 394,5 | 413,1 | 428,4 | 444,9 | 468,8 | 488,6 |
| Энантовый альдегид              | 276,7              | 286,3 | 300,0 | 311,3 | 323,5 | 341,1 | 355,8 | 371,8 | 395,2 | 415,1 |
| Энантонитрил                    | 288,6              | 299,6 | 315,6 | 328,8 | 343,1 | 364,2 | 381,9 | 401,4 | 430,5 | 455,4 |
| Эпихлоргидрин                   | 252,1              | 261,3 | 274,6 | 285,5 | 297,4 | 314,7 | 329,2 | 345,0 | 368,5 | 388,6 |
| 1,2-Этоксн-2-метилпропан        | 199,6              | 207,7 | 219,4 | 229,2 | 239,9 | 255,7 | 269,1 | 284,0 | 306,4 | 325,8 |
| Этан                            | 111,1              | 115,7 | 122,3 | 127,9 | 134,0 | 143,0 | 150,6 | 159,1 | 172,0 | 183,2 |
| Этанол                          | 238,6              | 246,5 | 257,8 | 267,0 | 276,9 | 291,2 | 303,0 | 315,9 | 334,6 | 350,3 |
| Этилакрилат                     | 238,4              | 247,2 | 259,9 | 270,5 | 281,8 | 298,5 | 312,4 | 327,7 | 350,4 | 369,8 |
| $\alpha$ -Этилакрилнитрил       | 239,1              | 248,5 | 262,2 | 273,6 | 285,9 | 304,2 | 319,6 | 336,6 | 362,1 | 384,1 |
| $\alpha$ -Этилакриловая кислота | 315,5              | 325,3 | 339,2 | 350,6 | 362,7 | 380,1 | 394,4 | 409,9 | 432,2 | 450,8 |
| Этиламин                        | 187,4              | 194,2 | 204,0 | 212,1 | 220,9 | 233,6 | 244,3 | 256,0 | 273,2 | 287,9 |
| N'-Этиламин                     | 306,2              | 317,6 | 334,1 | 347,6 | 362,4 | 383,9 | 402,0 | 421,8 | 451,3 | 476,4 |
| 4-Этиламин                      | 319,5              | 331,0 | 347,6 | 361,2 | 375,9 | 397,4 | 415,3 | 434,9 | 463,9 | 488,5 |
| Этилацетат                      | 226,0              | 234,2 | 246,1 | 255,9 | 266,5 | 281,9 | 294,9 | 309,1 | 330,0 | 347,9 |
| Этилацетоацетат                 | 296,3              | 306,9 | 322,2 | 334,8 | 348,4 | 368,2 | 384,7 | 402,8 | 429,5 | 452,2 |
| Этилбензол                      | 258,2              | 268,0 | 282,2 | 294,0 | 306,7 | 325,4 | 341,2 | 358,5 | 384,3 | 406,4 |
| Этилбромид                      | 195,2              | 202,6 | 213,5 | 222,5 | 232,2 | 246,6 | 258,7 | 272,0 | 291,8 | 308,9 |
| Этил- $\alpha$ -бромизобутират  | 278,2              | 288,6 | 303,7 | 316,1 | 329,7 | 349,5 | 366,1 | 384,4 | 411,5 | 434,8 |
| Этилбутират                     | 249,8              | 259,2 | 272,8 | 284,1 | 296,3 | 314,1 | 329,2 | 345,7 | 370,2 | 391,3 |
| Этилвинилдихлорсилан            | —                  | —     | 271,5 | 283,1 | 295,7 | 314,2 | 329,8 | 347,1 | 372,9 | 395,1 |
| 3-Этилгексан                    | 247,8              | 257,1 | 270,6 | 281,8 | 293,9 | 311,6 | 326,5 | 342,9 | 367,3 | 388,2 |
| Этилглицерат                    | 282,8              | 292,9 | 307,3 | 319,1 | 332,0 | 350,6 | 366,1 | 383,1 | 408,1 | 429,3 |
| 2-Этилдисилазан                 | 206,7              | 215,0 | 227,1 | 237,2 | 248,2 | 264,4 | 278,2 | 293,5 | 316,5 | 336,4 |
| Этилдихлорацетат                | 277,3              | 287,5 | 302,1 | 314,2 | 327,2 | 346,3 | 362,3 | 379,8 | 405,7 | 427,8 |
| Этилдихлорсилан                 | —                  | —     | 233,9 | 244,4 | 255,9 | 272,9 | 287,3 | 303,3 | 327,5 | 348,5 |
| Этил-N', N'-диэтилоксамат       | 343,8              | 356,1 | 373,7 | 388,2 | 403,9 | 426,7 | 445,7 | 466,5 | 497,2 | 523,2 |
| Этилен                          | 102,8              | 107,0 | 113,2 | 118,3 | 123,8 | 132,1 | 139,1 | 146,9 | 158,6 | 168,8 |
| Этилена оксид                   | 179,9              | 186,7 | 196,4 | 204,5 | 213,3 | 226,1 | 236,9 | 248,7 | 266,4 | 281,4 |
| 1,2-Этиленгликоль               | 322,3              | 332,8 | 347,7 | 360,0 | 373,1 | 392,0 | 407,7 | 424,6 | 449,3 | 470,0 |
| Этилендиамин                    | 257,3              | 266,4 | 279,3 | 289,9 | 301,4 | 318,0 | 331,9 | 347,0 | 369,3 | 388,1 |
| Этилен-бис-(хлорацетат)         | 379,7              | 392,1 | 409,8 | 424,3 | 439,8 | 462,3 | 480,8 | 500,9 | 530,2 | 554,7 |
| Этиленхлоргидрин                | 264,9              | 274,2 | 287,6 | 298,6 | 310,5 | 327,8 | 342,2 | 357,9 | 381,0 | 400,6 |
| Этилизобутират                  | 244,3              | 253,4 | 266,6 | 277,4 | 289,2 | 306,5 | 320,9 | 336,8 | 360,5 | 380,6 |
| Этилизовалерат                  | 262,0              | 271,7 | 285,5 | 297,0 | 309,5 | 327,6 | 342,8 | 359,5 | 384,2 | 405,3 |
| Этилизокапроат                  | 279,1              | 289,3 | 304,1 | 316,3 | 329,5 | 348,8 | 364,9 | 382,6 | 408,9 | 431,3 |
| Этилизоотиоцианат               | 255,5              | 265,2 | 279,3 | 291,0 | 303,7 | 322,4 | 338,0 | 355,3 | 381,1 | 403,2 |
| Этилиодид                       | 214,7              | 223,0 | 235,1 | 245,1 | 256,0 | 272,1 | 285,6 | 300,6 | 322,9 | 342,2 |
| Этиллевулинат                   | 314,8              | 325,9 | 341,8 | 355,0 | 369,2 | 389,8 | 406,9 | 425,7 | 453,3 | 476,7 |
| Этил-I-лейцинат                 | 298,0              | 309,2 | 325,4 | 338,8 | 353,4 | 374,7 | 392,6 | 412,3 | 441,6 | 466,6 |
| Этилмеркаптан                   | 192,7              | 200,1 | 210,9 | 219,8 | 229,5 | 243,7 | 255,7 | 268,8 | 288,6 | 305,6 |
| Этилметиловый эфир              | 178,0              | 184,7 | 194,4 | 202,4 | 211,1 | 223,8 | 234,4 | 246,2 | 263,6 | 278,5 |
| 3-Этилпентан                    | 230,7              | 239,4 | 252,0 | 262,5 | 273,8 | 290,4 | 304,4 | 319,7 | 342,6 | 362,2 |
| Этилпропиловый эфир             | 204,4              | 212,6 | 224,4 | 234,3 | 245,2 | 261,1 | 274,6 | 289,6 | 312,1 | 331,6 |
| Этилпропионат                   | 240,5              | 249,2 | 261,7 | 272,1 | 283,3 | 299,6 | 313,3 | 328,2 | 350,3 | 369,2 |
| Этилтриметилолово               | 238,5              | 247,8 | 261,1 | 272,2 | 284,3 | 302,0 | 317,0 | 333,5 | 358,1 | 379,3 |
| Этилтрифторсилан                | 174,6              | 180,8 | 189,7 | 197,1 | 205,1 | 216,6 | 226,3 | 236,8 | 252,4 | 265,6 |
| Этилтрихлорацетат               | 288,1              | 298,3 | 313,1 | 325,2 | 338,3 | 357,4 | 373,3 | 390,7 | 416,3 | 438,1 |
| Этилтрихлорсилан                | —                  | —     | 254,3 | 265,1 | 276,9 | 294,2 | 308,8 | 324,9 | 349,0 | 369,7 |
| Этилтриэтоксисилан              | —                  | —     | 304,9 | 317,1 | 330,3 | 349,5 | 365,6 | 383,3 | 409,4 | 431,7 |
| 2-Этилфенол                     | 313,8              | 325,0 | 341,1 | 354,4 | 368,8 | 389,7 | 407,1 | 426,2 | 454,3 | 478,2 |
| 3-Этилфенол                     | 327,7              | 338,8 | 354,6 | 367,6 | 381,6 | 401,8 | 418,6 | 436,8 | 463,5 | 486,0 |
| 4-Этилфенол                     | 326,7              | 338,0 | 354,3 | 367,7 | 382,1 | 403,1 | 420,5 | 439,5 | 467,4 | 491,0 |
| Этилформиат                     | 207,6              | 215,4 | 226,4 | 236,0 | 246,2 | 261,0 | 273,5 | 287,2 | 307,6 | 325,0 |
| Этилфторид                      | 152,3              | 158,1 | 166,3 | 173,2 | 180,7 | 191,6 | 200,7 | 210,8 | 225,8 | 238,7 |



| Вещество               | Давление пара, кПа |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 0,1                | 0,2   | 0,5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   |
| Этил-2-фураат          | 304,7              | 315,7 | 331,5 | 344,5 | 358,6 | 379,1 | 396,2 | 414,9 | 442,6 | 466,1 |
| Этилхлорацетат         | 269,6              | 279,4 | 293,7 | 305,4 | 318,1 | 336,7 | 352,2 | 369,3 | 394,5 | 416,0 |
| Этилхлорид             | 179,2              | 186,0 | 195,9 | 204,0 | 212,9 | 226,0 | 236,9 | 249,0 | 267,0 | 282,4 |
| Этил-α-хлорпропионат   | 274,9              | 284,6 | 298,5 | 309,9 | 322,3 | 340,3 | 355,2 | 371,6 | 395,6 | 416,0 |
| Этилцианацетат         | 337,0              | 347,3 | 362,0 | 373,9 | 386,7 | 405,0 | 420,0 | 436,2 | 459,6 | 479,1 |
| Этилциклогексан        | 253,6              | 263,3 | 277,4 | 289,1 | 301,8 | 320,5 | 336,2 | 353,5 | 379,4 | 401,6 |
| Этилциклопентан        | 236,0              | 245,0 | 258,0 | 268,9 | 280,6 | 297,9 | 312,4 | 328,4 | 352,3 | 372,7 |
| Этил-α-этилацетоацетат | 307,9              | 318,9 | 334,7 | 347,7 | 361,8 | 382,3 | 399,4 | 418,1 | 445,7 | 469,1 |
| Этокситриметилсилан    | 217,8              | 226,2 | 238,4 | 248,6 | 259,6 | 275,8 | 289,5 | 304,6 | 327,2 | 346,6 |
| Янтарный ангидрид      | 354,6              | 366,8 | 384,2 | 398,5 | 414,0 | 436,3 | 454,9 | 475,2 | 504,9 | 529,9 |

Таблица 11.6. Давление паров органических веществ (выше 10<sup>5</sup> Па) [115]

| <i>t</i> , °C                                       | <i>p</i> , 10 <sup>5</sup> Па | <i>t</i> , °C                                   | <i>p</i> , 10 <sup>5</sup> Па | <i>t</i> , °C                                       | <i>p</i> , 10 <sup>5</sup> Па | <i>t</i> , °C                                       | <i>p</i> , 10 <sup>5</sup> Па |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Анилин (C<sub>6</sub>H<sub>7</sub>N)</b>         |                               | 420                                             | 5,479                         | 277,0                                               | 40,52                         | 120                                                 | 3,986                         |
|                                                     |                               | 430                                             | 6,704                         | 288,0                                               | 49,03                         | 130                                                 | 4,973                         |
| 212,8                                               | 2,02                          | 440                                             | 8,121                         |                                                     |                               | 140                                                 | 6,128                         |
| 254,8                                               | 5,06                          | 450                                             | 9,746                         | <b>Бутен-1 (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>)</b>         |                               | 150                                                 | 7,468                         |
| 292,7                                               | 10,13                         | 460                                             | 11,60                         |                                                     |                               | 160                                                 | 9,036                         |
| 342,0                                               | 20,26                         | 470                                             | 11,69                         | 0                                                   | 1,285                         | 170                                                 | 10,85                         |
| 375,5                                               | 30,39                         | 480                                             | 16,01                         | 10                                                  | 1,838                         | 180                                                 | 12,94                         |
| 400,0                                               | 40,52                         | 490                                             | 18,70                         | 20                                                  | 2,557                         | 190                                                 | 15,32                         |
| 422,4                                               | 50,65                         | 500                                             | 21,66                         | 30                                                  | 3,472                         | 200                                                 | 18,02                         |
| 426,0                                               | 53,08                         | 510                                             | 24,96                         | 40                                                  | 4,62                          | 210                                                 | 21,08                         |
| <b>Ацетилен (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) (T, K)</b> |                               | 520                                             | 28,62                         | 50                                                  | 6,02                          | 220                                                 | 24,52                         |
|                                                     |                               | 530                                             | 32,69                         | 60                                                  | 7,63                          | 230                                                 | 28,37                         |
| 192,4                                               | 1,283                         | 540                                             | 37,19                         | 70                                                  | 9,59                          | 234,7                                               | 30,31                         |
| 200,9                                               | 2,026                         | 550                                             | 42,18                         | 80                                                  | 11,93                         |                                                     |                               |
| 209,4                                               | 3,039                         | 560                                             | 47,71                         | 90                                                  | 14,68                         | <b>Гексен-1 (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>)</b>       |                               |
| 221,5                                               | 5,065                         | 562,6                                           | 49,24                         | 100                                                 | 17,89                         | 70                                                  | 1,2398                        |
| 230,4                                               | 7,091                         |                                                 |                               | 110                                                 | 21,59                         | 80                                                  | 1,6626                        |
| 240,7                                               | 10,13                         | <b>н-Бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)</b>    |                               | 120                                                 | 25,84                         | 90                                                  | 2,1885                        |
| 253,2                                               | 15,20                         | 0                                               | 1,032                         | 130                                                 | 30,68                         | 100                                                 | 2,8326                        |
| 263,0                                               | 20,26                         | 10                                              | 1,483                         | 140                                                 | 36,15                         | 110                                                 | 3,610                         |
| 271,6                                               | 25,33                         | 20                                              | 2,074                         | 146,4                                               | 40,2                          | 120                                                 | 4,537                         |
| 278,9                                               | 30,39                         | 30                                              | 2,83                          | <b>н-Бутилбензол (C<sub>10</sub>H<sub>14</sub>)</b> |                               | 130                                                 | 5,629                         |
| 284,9                                               | 35,45                         | 40                                              | 3,78                          | 190                                                 | 1,1917                        | <b>н-Гептадексан (C<sub>17</sub>H<sub>36</sub>)</b> |                               |
| 290,4                                               | 40,52                         | 50                                              | 4,96                          | 200                                                 | 1,5018                        | 310                                                 | 1,1794                        |
| 300,0                                               | 50,65                         | 60                                              | 6,39                          | 210                                                 | 1,8714                        | 462                                                 | 13,169                        |
| 307,8                                               | 60,78                         | 70                                              | 8,10                          | 220                                                 | 2,3078                        |                                                     |                               |
| 308,7                                               | 62,45                         | 80                                              | 10,13                         | 230                                                 | 2,8185                        | <b>н-Гептан (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>)</b>       |                               |
| <b>Ацетон (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O)</b>         |                               | 90                                              | 12,50                         | 240                                                 | 3,411                         | 100                                                 | 1,0606                        |
|                                                     |                               | 100                                             | 15,29                         | 250                                                 | 4,094                         | 120                                                 | 1,8330                        |
| 78,6                                                | 2,02                          | 110                                             | 18,52                         | <b>Бутин-1 (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>)</b>         |                               | 140                                                 | 2,979                         |
| 113,0                                               | 5,06                          | 120                                             | 22,23                         | 10                                                  | 1,06                          | 160                                                 | 4,599                         |
| 144,5                                               | 10,13                         | 130                                             | 26,48                         | 20                                                  | 1,47                          | 180                                                 | 6,78                          |
| 181,0                                               | 20,26                         | 140                                             | 31,29                         | 30                                                  | 1,70                          | 200                                                 | 9,71                          |
| 205,0                                               | 30,39                         | 150                                             | 36,73                         | 40                                                  | 1,96                          | 220                                                 | 13,54                         |
| 214,5                                               | 40,52                         | 152,01                                          | 37,96                         | <b>н-Гексан (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>)</b>       |                               | 240                                                 | 18,47                         |
| 235,0                                               | 47,61                         | <b>н-Бутанол (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O)</b> |                               | 70                                                  | 1,0537                        | 260                                                 | 24,65                         |
| <b>Бензол (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) (T, K)</b>   |                               | 139,8                                           | 2,03                          | 80                                                  | 1,4239                        | 267,01                                              | 27,36                         |
|                                                     |                               | 172,5                                           | 5,06                          | 90                                                  | 1,8876                        |                                                     |                               |
| 360                                                 | 1,243                         | 203,0                                           | 10,13                         | 100                                                 | 2,460                         |                                                     |                               |
| 380                                                 | 2,164                         | 237,0                                           | 20,26                         | 110                                                 | 3,153                         |                                                     |                               |
| 400                                                 | 3,536                         | 259,0                                           | 30,39                         |                                                     |                               |                                                     |                               |
| 410                                                 | 4,428                         |                                                 |                               |                                                     |                               |                                                     |                               |



| $t, ^\circ\text{C}$                                                       | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                        | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                            | $p, 10^5 \text{ Па}$ |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Гептен-1 (<math>\text{C}_7\text{H}_{14}</math>)</b>                    |                      | <b>Дифтормонохлорметан (фреон-22) (<math>\text{CHF}_2\text{Cl}</math>)</b> |                      |                                                                    |                      | <b>2-Метилбутадиен-1,3 (<math>\text{C}_5\text{H}_8</math>)</b> |                      |
| 100                                                                       | 1,2180               | —40                                                                        | 1,054                | 200                                                                | 3,622                | 40                                                             | 1,2374               |
| 110                                                                       | 1,6046               |                                                                            |                      | 210                                                                | 4,390                | 50                                                             | 1,7012               |
| 120                                                                       | 2,0797               |                                                                            |                      | 220                                                                | 5,280                | 60                                                             | 2,2889               |
| 130                                                                       | 2,6556               |                                                                            |                      | 230                                                                | 6,305                | 70                                                             | 3,0202               |
| 140                                                                       | 3,345                |                                                                            |                      | 240                                                                | 7,500                | 80                                                             | 3,915                |
| 150                                                                       | 4,161                | —20                                                                        | 2,456                | 250                                                                | 8,820                | 90                                                             | 4,996                |
| 160                                                                       | 5,118                | —30                                                                        | 1,641                | 260                                                                | 10,32                | 100                                                            | 6,282                |
| <b>n-Декан (<math>\text{C}_{10}\text{H}_{22}</math>)</b>                  |                      | —10                                                                        | 3,552                | 270                                                                | 12,00                | <b>2-Метилбутан (<math>\text{C}_5\text{H}_{12}</math>)</b>     |                      |
| 180                                                                       | 1,1737               | 0                                                                          | 4,983                | 280                                                                | 13,90                | 30                                                             | 1,090                |
|                                                                           | 1,4921               | 10                                                                         | 6,811                | 290                                                                | 16,02                | 40                                                             | 1,511                |
|                                                                           | 1,8740               | 20                                                                         | 9,097                | 300                                                                | 18,35                | 50                                                             | 2,048                |
|                                                                           | 2,3274               | 30                                                                         | 11,908               | 310                                                                | 20,95                | 60                                                             | 2,719                |
|                                                                           | 2,8603               | 40                                                                         | 15,315               | 320                                                                | 23,79                | 70                                                             | 3,541                |
|                                                                           | 3,482                | 50                                                                         | 19,395               | 330                                                                | 26,87                | 80                                                             | 4,536                |
|                                                                           | 4,199                | 60                                                                         | 24,236               | 340                                                                | 30,32                | 90                                                             | 5,721                |
|                                                                           | 5,022                | 70                                                                         | 29,94                | 350                                                                | 34,36                | 100                                                            | 7,11                 |
|                                                                           | 21,07                | 80                                                                         | 36,62                | <b>Метан (<math>\text{CH}_4</math>) (<math>T, \text{K}</math>)</b> |                      | 110                                                            | 8,77                 |
|                                                                           |                      | 90                                                                         | 44,43                | 115                                                                | 1,324                | 120                                                            | 10,69                |
| <b>1,1-Диметилциклопентан (<math>\text{C}_7\text{H}_{14}</math>)</b>      |                      | 96,13                                                                      | 49,86                | 120                                                                | 1,920                | 130                                                            | 12,93                |
| 90                                                                        | 1,0784               | <b>n-Додекан (<math>\text{C}_{12}\text{H}_{26}</math>)</b>                 |                      | 125                                                                | 2,691                | 140                                                            | 15,49                |
| 100                                                                       | 1,4263               | 220                                                                        | 1,1059               | 130                                                                | 3,671                | 150                                                            | 18,43                |
| 110                                                                       | 1,8550               |                                                                            |                      | 135                                                                | 4,895                | 160                                                            | 21,75                |
| 120                                                                       | 2,3756               |                                                                            |                      | 140                                                                | 6,375                | 170                                                            | 25,51                |
| 130                                                                       | 2,9998               |                                                                            |                      | 145                                                                | 8,136                | 180                                                            | 29,71                |
| 140                                                                       | 3,7397               |                                                                            |                      | 150                                                                | 10,33                | 187,8                                                          | 33,3                 |
| 150                                                                       | 4,6070               | 230                                                                        | 1,3890               | 155                                                                | 12,88                | <b>2-Метилпропен (<math>\text{C}_4\text{H}_8</math>)</b>       |                      |
| 160                                                                       | 5,6137               | 240                                                                        | 1,7258               | 160                                                                | 15,88                | 0                                                              | 1,315                |
| <b>Дифенил (<math>\text{C}_{12}\text{H}_{10}</math>)</b>                  |                      | 250                                                                        | 2,1227               | 165                                                                | 19,38                | 10                                                             | 1,87                 |
| 260                                                                       | 1,08                 | 286                                                                        | 18,1                 | 170                                                                | 23,38                | 20                                                             | 2,58                 |
| 280                                                                       | 1,74                 | <b>Изопропилбензол (<math>\text{C}_9\text{H}_{12}</math>)</b>              |                      | 175                                                                | 27,88                | 30                                                             | 3,50                 |
| 300                                                                       | 2,38                 | 160                                                                        | 1,2290               | 180                                                                | 32,88                | 40                                                             | 4,64                 |
| 320                                                                       | 3,38                 |                                                                            |                      | 185                                                                | 38,54                | 50                                                             | 6,06                 |
| 340                                                                       | 4,47                 |                                                                            |                      | 190                                                                | 45,52                | 60                                                             | 7,77                 |
| 360                                                                       | 6,55                 |                                                                            |                      | 190,55                                                             | 46,41                | 70                                                             | 9,82                 |
| 380                                                                       | 8,8                  |                                                                            |                      | <b>Метанол (<math>\text{CH}_4\text{O}</math>)</b>                  |                      | 80                                                             | 12,26                |
| <b>Дифтордихлорметан (фреон-12) (<math>\text{CF}_2\text{Cl}_2</math>)</b> |                      | 170                                                                        | 1,5656               | 84,0                                                               | 2,03                 | 90                                                             | 15,09                |
| —30                                                                       | 1,0143               | 180                                                                        | 1,9698               | 112,5                                                              | 5,06                 | 100                                                            | 18,37                |
| —20                                                                       | 1,527                | 190                                                                        | 2,4498               | 138,0                                                              | 10,13                | 110                                                            | 22,16                |
| —10                                                                       | 2,219                | 200                                                                        | 3,0146               | 167,8                                                              | 20,26                | 120                                                            | 26,34                |
| 0                                                                         | 3,125                | 210                                                                        | 3,673                | 186,5                                                              | 30,39                | 130                                                            | 31,28                |
| 10                                                                        | 4,285                | 220                                                                        | 4,434                | 203,5                                                              | 40,52                | 140                                                            | 36,70                |
| 20                                                                        | 5,739                | 230                                                                        | 5,306                | 214,0                                                              | 50,65                | <b>Метил хлористый (<math>\text{CH}_3\text{Cl}</math>)</b>     |                      |
| 30                                                                        | 7,529                | <b>орто-Ксилол (<math>\text{C}_8\text{H}_{10}</math>)</b>                  |                      | 224,0                                                              | 60,78                | —20                                                            | 1,188                |
| 40                                                                        | 9,687                | 150                                                                        | 1,172                | 240,0                                                              | 79,72                | —10                                                            | 1,772                |
| 50                                                                        | 12,28                |                                                                            |                      | <b>Метилацетилен (<math>\text{C}_3\text{H}_4</math>)</b>           |                      | 0                                                              | 2,557                |
| 60                                                                        | 15,34                |                                                                            |                      | —20                                                                | 1,17                 | 10                                                             | 3,582                |
| 70                                                                        | 18,94                |                                                                            |                      | —10                                                                | 1,84                 | 20                                                             | 4,893                |
| 80                                                                        | 23,13                |                                                                            |                      | 0                                                                  | 2,79                 | 30                                                             | 6,525                |
| 90                                                                        | 27,99                | 160                                                                        | 1,505                | 10                                                                 | 4,05                 | 40                                                             | 8,516                |
| 100                                                                       | 33,60                | 170                                                                        | 1,907                | 20                                                                 | 5,77                 | 50                                                             | 10,92                |
| 111,8                                                                     | 41,32                | 180                                                                        | 2,388                | 30                                                                 | 6,79                 | 60                                                             | 13,75                |
|                                                                           |                      | 190                                                                        | 2,956                | 40                                                                 | 8,00                 | <b>Метилциклогексан (<math>\text{C}_7\text{H}_{14}</math>)</b> |                      |
|                                                                           |                      |                                                                            |                      | 50                                                                 | 10,84                | 110                                                            | 1,2986               |
|                                                                           |                      |                                                                            |                      | 60                                                                 | 14,38                | 130                                                            | 2,146                |
|                                                                           |                      |                                                                            |                      | 70                                                                 | 18,64                | 150                                                            | 3,362                |
|                                                                           |                      |                                                                            |                      |                                                                    |                      | 170                                                            | 5,01                 |

| $t, ^\circ\text{C}$                                                 | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                       | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                          | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                                   | $p, 10^5 \text{ Па}$ |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 190                                                                 | 7,23                 | 270                                                                       | 2,99                 | 180                                                                          | 25,84                | 80                                                                                    | 37,47                |
| 210                                                                 | 10,10                | 280                                                                       | 3,57                 | 190                                                                          | 30,04                | 90                                                                                    | 44,88                |
| 230                                                                 | 13,83                | 290                                                                       | 4,23                 | 196,62                                                                       | 33,74                | 91,9                                                                                  | 46,0                 |
| 250                                                                 | 18,48                | 300                                                                       | 4,97                 | <b>Пентен-1 (<math>\text{C}_5\text{H}_{10}</math>)</b>                       |                      | <b>Толуол (<math>\text{C}_7\text{H}_8</math>)</b>                                     |                      |
| 270                                                                 | 24,21                | 310                                                                       | 5,82                 | 40                                                                           | 1,4162               | 120                                                                                   | 1,312                |
| 290                                                                 | 31,16                | 320                                                                       | 6,79                 | 60                                                                           | 2,5797               | 140                                                                                   | 2,180                |
| <b>Метилциклопентан (<math>\text{C}_6\text{H}_{12}</math>)</b>      |                      | 330                                                                       | 7,86                 | 80                                                                           | 4,354                | 160                                                                                   | 3,433                |
| 80                                                                  | 1,2946               | 340                                                                       | 9,05                 | 100                                                                          | 6,900                | 180                                                                                   | 5,165                |
| 100                                                                 | 2,238                | 350                                                                       | 10,33                | 120                                                                          | 10,54                | 200                                                                                   | 7,474                |
| 120                                                                 | 3,632                | 360                                                                       | 11,85                | 140                                                                          | 15,26                | 220                                                                                   | 10,93                |
| 140                                                                 | 5,59                 | 370                                                                       | 13,37                | 160                                                                          | 21,56                | 240                                                                                   | 15,26                |
| 160                                                                 | 8,22                 | <b><math>n</math>-Нонадекан (<math>\text{C}_{19}\text{H}_{40}</math>)</b> |                      | 180                                                                          | 29,76                | 260                                                                                   | 20,50                |
| 180                                                                 | 11,73                | 340                                                                       | 1,195                | 200                                                                          | 40,26                | 280                                                                                   | 26,69                |
| 200                                                                 | 16,28                | 487                                                                       | 12,156               | 201                                                                          | 40,4                 | 300                                                                                   | 33,82                |
| 220                                                                 | 22,05                | <b><math>n</math>-Нонан (<math>\text{C}_9\text{H}_{20}</math>)</b>        |                      | <b>Пропадиеи (<math>\text{C}_3\text{H}_4</math>)</b>                         |                      | 310                                                                                   | 37,74                |
| 240                                                                 | 29,24                | 160                                                                       | 1,2846               | -30                                                                          | 1,22                 | <b><math>n</math>-Тридекан (<math>\text{C}_{13}\text{H}_{28}</math>)</b>              |                      |
| <b>Монофтордихлорметан (фреон-21) (<math>\text{CHFCl}_2</math>)</b> |                      | 170                                                                       | 1,6410               | -20                                                                          | 1,84                 | 240                                                                                   | 1,1230               |
| 10                                                                  | 1,0578               | 180                                                                       | 2,070                | -10                                                                          | 2,68                 | 404                                                                                   | 17,2                 |
| 20                                                                  | 1,5305               | 190                                                                       | 2,579                | 0                                                                            | 3,81                 | <b>Трифтормонохлорметан (фреон-13) (<math>\text{CF}_3\text{Cl}</math>)</b>            |                      |
| 30                                                                  | 2,1534               | 200                                                                       | 3,179                | 10                                                                           | 5,28                 | -80                                                                                   | 1,094                |
| 40                                                                  | 2,9550               | 210                                                                       | 3,879                | 20                                                                           | 7,14                 | -70                                                                                   | 1,797                |
| 50                                                                  | 3,9655               | 220                                                                       | 4,689                | 25                                                                           | 8,24                 | -60                                                                                   | 2,803                |
| 60                                                                  | 5,2160               | 230                                                                       | 5,618                | 30                                                                           | 9,47                 | -50                                                                                   | 4,183                |
| 70                                                                  | 6,7389               | 322                                                                       | 22,8                 | 40                                                                           | 12,4                 | -40                                                                                   | 6,017                |
| 80                                                                  | 8,5675               | <b><math>n</math>-Октан (<math>\text{C}_8\text{H}_{18}</math>)</b>        |                      | 50                                                                           | 15,8                 | -30                                                                                   | 8,393                |
| 90                                                                  | 10,737               | 130                                                                       | 1,1408               | 60                                                                           | 20,0                 | -20                                                                                   | 11,40                |
| 100                                                                 | 13,283               | 150                                                                       | 1,9022               | 70                                                                           | 24,8                 | -10                                                                                   | 15,13                |
| 110                                                                 | 16,245               | 170                                                                       | 3,006                | <b>Пропан (<math>\text{C}_3\text{H}_8</math>) (<math>T, \text{K}</math>)</b> |                      | 0                                                                                     | 19,70                |
| 120                                                                 | 19,666               | 190                                                                       | 4,536                | 231,10                                                                       | 1,013                | 10                                                                                    | 25,23                |
| 130                                                                 | 23,593               | 210                                                                       | 6,582                | 259,83                                                                       | 3,039                | 20                                                                                    | 31,84                |
| 140                                                                 | 28,081               | 230                                                                       | 9,270                | 275,24                                                                       | 5,065                | 23,13                                                                                 | 39,00                |
| 150                                                                 | 33,195               | 250                                                                       | 12,79                | 286,90                                                                       | 7,091                | <b>Тетрафтордихлорэтан (фреон-114) (<math>\text{C}_2\text{F}_4\text{Cl}_2</math>)</b> |                      |
| 160                                                                 | 39,008               | 270                                                                       | 17,29                | 296,30                                                                       | 9,117                | 5                                                                                     | 1,069                |
| 170                                                                 | 45,612               | 290                                                                       | 22,94                | 317,42                                                                       | 15,20                | 10                                                                                    | 1,289                |
| 178,25                                                              | 51,812               | 296,2                                                                     | 24,96                | 341,71                                                                       | 25,33                | 20                                                                                    | 1,836                |
| <b>Монофтортрихлорметан (фреон-11) (<math>\text{CFCl}_3</math>)</b> |                      | <b>Октен-1 (<math>\text{C}_8\text{H}_{16}</math>)</b>                     |                      | 359,61                                                                       | 35,45                | 30                                                                                    | 2,584                |
| 24                                                                  | 1,026                | 130                                                                       | 1,2843               | 370,0                                                                        | 42,65                | 40                                                                                    | 3,453                |
| 30                                                                  | 1,263                | 140                                                                       | 1,6619               | <b>Пропанол-1 (<math>\text{C}_3\text{H}_8\text{O}</math>)</b>                |                      | 50                                                                                    | 4,583                |
| 40                                                                  | 1,748                | 150                                                                       | 2,1202               | 117,0                                                                        | 2,03                 | 60                                                                                    | 5,963                |
| 50                                                                  | 2,366                | 160                                                                       | 2,6698               | 149,0                                                                        | 5,06                 | <b>Углерод четыреххлористый (<math>\text{CCl}_4</math>)</b>                           |                      |
| 60                                                                  | 3,138                | 170                                                                       | 3,322                | 177,0                                                                        | 10,13                | 90                                                                                    | 1,482                |
| 70                                                                  | 4,088                | 180                                                                       | 4,086                | 210,8                                                                        | 20,26                | 110                                                                                   | 2,506                |
| 80                                                                  | 5,240                | <b><math>n</math>-Пентан (<math>\text{C}_5\text{H}_{12}</math>)</b>       |                      | 232,3                                                                        | 30,39                | 130                                                                                   | 4,001                |
| 90                                                                  | 6,619                | 40                                                                        | 1,156                | 250,0                                                                        | 40,52                | 150                                                                                   | 6,071                |
| 100                                                                 | 8,253                | 50                                                                        | 1,591                | 263,7                                                                        | 50,55                | 170                                                                                   | 8,852                |
| 110                                                                 | 10,168               | 60                                                                        | 2,145                | <b>Пропилен (<math>\text{C}_3\text{H}_6</math>)</b>                          |                      | 190                                                                                   | 12,41                |
| 120                                                                 | 12,393               | 70                                                                        | 2,832                | -40                                                                          | 1,425                | 210                                                                                   | 17,01                |
| 130                                                                 | 14,959               | 80                                                                        | 3,676                | -30                                                                          | 2,132                | 230                                                                                   | 22,73                |
| 140                                                                 | 17,896               | 90                                                                        | 4,693                | -20                                                                          | 3,08                 | 250                                                                                   | 29,57                |
| <b>Нафталин (<math>\text{C}_{10}\text{H}_8</math>)</b>              |                      | 100                                                                       | 5,906                | -10                                                                          | 4,30                 | 270                                                                                   | 38,65                |
| 220                                                                 | 1,060                | 110                                                                       | 7,333                | 0                                                                            | 5,82                 | 283,05                                                                                | 46,49                |
| 230                                                                 | 1,321                | 120                                                                       | 8,985                | 10                                                                           | 7,74                 |                                                                                       |                      |
| 240                                                                 | 1,629                | 130                                                                       | 10,94                | 20                                                                           | 10,10                |                                                                                       |                      |
| 250                                                                 | 1,993                | 140                                                                       | 13,20                | 30                                                                           | 12,98                |                                                                                       |                      |
| 260                                                                 | 2,53                 | 150                                                                       | 15,79                | 40                                                                           | 16,45                |                                                                                       |                      |
|                                                                     |                      | 160                                                                       | 18,74                | 50                                                                           | 20,54                |                                                                                       |                      |
|                                                                     |                      | 170                                                                       | 22,08                | 60                                                                           | 25,38                |                                                                                       |                      |
|                                                                     |                      |                                                                           |                      | 70                                                                           | 31,00                |                                                                                       |                      |

| $t, ^\circ\text{C}$                                            | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                         | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                             | $p, 10^5 \text{ Па}$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                   | $p, 10^5 \text{ Па}$ |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Хлорбензол (<math>\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}</math>)</b> |                      | <b>Циклопентан (<math>\text{C}_5\text{H}_{10}</math>)</b>                   |                      | <b>Этилен (<math>\text{C}_2\text{H}_4</math>)</b>               |                      |                                                                       |                      |
| 140                                                            | 1,252                | 50                                                                          | 1,038                | 183,0                                                           | 20,26                |                                                                       |                      |
| 160                                                            | 2,044                | 70                                                                          | 1,905                | 203,0                                                           | 30,39                |                                                                       |                      |
| 180                                                            | 3,158                | 90                                                                          | 3,252                | 218,0                                                           | 40,52                |                                                                       |                      |
| 200                                                            | 4,693                | 110                                                                         | 5,211                | 230,0                                                           | 50,65                | 0                                                                     | 40,94                |
| 220                                                            | 6,739                | 130                                                                         | 7,950                | 242,0                                                           | 60,78                | 2                                                                     | 42,84                |
| 240                                                            | 9,434                | 150                                                                         | 11,67                | 243,1                                                           | 63,92                | 4                                                                     | 44,79                |
| 260                                                            | 12,85                | 170                                                                         | 16,58                | <b>Этилацетат (<math>\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2</math>)</b> |                      | 6                                                                     | 46,82                |
| 329,2                                                          | 31,90                | 190                                                                         | 22,87                |                                                                 |                      | 8                                                                     | 48,92                |
| 359,2                                                          | 45,22                | 210                                                                         | 30,74                |                                                                 |                      | 9,5                                                                   | 50,6                 |
|                                                                |                      | 230                                                                         | 40,39                | 80                                                              | 1,110                |                                                                       |                      |
| <b>Циклогексан (<math>\text{C}_6\text{H}_{12}</math>)</b>      |                      | <b>Этан (<math>\text{C}_2\text{H}_6</math>) (<math>T, \text{ K}</math>)</b> |                      | 100                                                             | 2,022                | <b>Эфир диэтиловый (<math>\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}</math>)</b> |                      |
| 90                                                             | 1,3272               | 184,52                                                                      | 1,013                | 120                                                             | 3,447                |                                                                       |                      |
| 110                                                            | 2,260                | 190                                                                         | 1,347                | 140                                                             | 5,552                | 40                                                                    | 1,228                |
| 130                                                            | 3,622                | 200                                                                         | 2,174                | 160                                                             | 8,489                |                                                                       |                      |
| 150                                                            | 5,52                 | 210                                                                         | 3,340                | 180                                                             | 12,42                | 60                                                                    | 2,311                |
| 170                                                            | 8,059                | 220                                                                         | 4,921                | 200                                                             | 17,60                |                                                                       |                      |
| 190                                                            | 11,34                | 230                                                                         | 7,002                | 220                                                             | 24,33                | 80                                                                    | 3,964                |
| 210                                                            | 15,52                | 240                                                                         | 9,675                | 240                                                             | 33,06                | 100                                                                   | 6,471                |
| 230                                                            | 20,82                | 250                                                                         | 13,02                | 250,1                                                           | 38,49                | 120                                                                   | 10,01                |
| 250                                                            | 27,45                | 260                                                                         | 17,12                | <b>Этилбензол (<math>\text{C}_8\text{H}_{10}</math>)</b>        |                      | 140                                                                   | 14,73                |
| 270                                                            | 35,61                | 270                                                                         | 22,08                |                                                                 |                      | 160                                                                   | 21,03                |
| <b>Циклогексен (<math>\text{C}_6\text{H}_{10}</math>)</b>      |                      | 280                                                                         | 28,01                | 140                                                             | 1,1211               | 180                                                                   | 29,02                |
| 90                                                             | 1,2450               | 290                                                                         | 35,10                | 150                                                             | 1,4477               | 190                                                                   | 34,01                |
| 100                                                            | 1,6443               | 300                                                                         | 43,65                | 160                                                             | 1,8440               | 193,8                                                                 | 36,06                |
| 110                                                            | 2,1358               | 305,5                                                                       | 49,13                | 170                                                             | 2,319                |                                                                       |                      |
| 120                                                            | 2,7324               | <b>Этанол (<math>\text{C}_2\text{H}_6\text{O}</math>)</b>                   |                      | 180                                                             | 2,883                |                                                                       |                      |
| 130                                                            | 3,447                | 97,5                                                                        | 2,03                 | 190                                                             | 3,546                |                                                                       |                      |
| 140                                                            | 4,294                | 126,0                                                                       | 5,06                 | 200                                                             | 4,317                |                                                                       |                      |
| 150                                                            | 5,287                | 151,8                                                                       | 10,13                | 210                                                             | 5,208                |                                                                       |                      |
|                                                                |                      |                                                                             |                      | 220                                                             | 6,229                |                                                                       |                      |

#### 11.4. КОЭФФИЦИЕНТ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПНЫХ МОЛЕКУЛ

Коэффициент разделения двухкомпонентной жидкой смеси определяется как отношение относительных концентраций компонент  $c_1, c_2$  в паре и в жидкости:

$$\alpha = \left( \frac{c_1}{c_2} \right)_{\text{пар}} / \left( \frac{c_1}{c_2} \right)_{\text{жидк}}$$

Для идеальных растворов, к которым относятся смеси изотопных молекул, коэффициент разделения равен отношению давлений пара чистых компонент:

$$\alpha(t) = p_1(t)/p_2(t).$$

В табл. 11.7 приведены значения коэффициента разделения изотопных молекул.

Таблица 11.7. Значения коэффициента разделения молекул двухкомпонентных изотопных смесей при различной температуре

| $t, ^\circ\text{C}$                                               | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                 | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                 | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\alpha$ |
|-------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------|----------|---------------------|----------|
| <b>Азота тетраоксид</b>                                           |          | <b>Анилин</b>                                                       |          | <b>Бензол</b>                                       |          |                     |          |
| $^{14}\text{N}_2\text{O}_4 - ^{14}\text{N}^{15}\text{NO}_4$ [121] |          | $\text{C}_6\text{D}_7\text{N} - \text{C}_6\text{H}_7\text{N}$ [122] |          | $\text{C}_6\text{D}_6 - \text{C}_6\text{H}_6$ [123] |          |                     |          |
| 21                                                                | 1,0038   | 50                                                                  | 1,036    | 70                                                  | 1,011    | 10                  | 1,0241   |
|                                                                   |          | 55                                                                  | 1,026    | 75                                                  | 1,008    | 20                  | 1,0249   |
|                                                                   |          | 60                                                                  | 1,019    | 80                                                  | 1,006    | 30                  | 1,0258   |
|                                                                   |          | 65                                                                  | 1,014    |                                                     |          | 40                  | 1,0262   |
|                                                                   |          |                                                                     |          |                                                     |          | 50                  | 1,0261   |
|                                                                   |          |                                                                     |          |                                                     |          | 60                  | 1,0254   |
|                                                                   |          |                                                                     |          |                                                     |          | 70                  | 1,0251   |
|                                                                   |          |                                                                     |          |                                                     |          | 80                  | 1,0249   |
|                                                                   |          |                                                                     |          |                                                     |          | 82                  | 1,0249   |

| $t, ^\circ\text{C}$                                                       | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                       | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                           | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                     | $\alpha$ |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| $^{13}\text{C}_6\text{H}_6 - ^{12}\text{C}_6\text{H}_6$ [124]             |          | 190                                                       | 1,008    | <b>Изовалериановая кислота</b>                                                |          | <b>Масляная кислота</b>                                                 |          |
| 34,6                                                                      | 1,00025  | 200                                                       | 1,005    | $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2 - \text{C}_5\text{D}_{10}\text{O}_2$ [122] |          | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2 - \text{C}_4\text{D}_8\text{O}_2$ [122] |          |
| <b>Бор трехфтористый</b>                                                  |          | 210                                                       | 1,003    | 55                                                                            | 1,034    | 50                                                                      | 1,010    |
| $^{11}\text{BF}_3 - ^{10}\text{BF}_3$ [125]                               |          | 220                                                       | 1,001    | 60                                                                            | 1,036    | 60                                                                      | 1,029    |
| $-\text{H}_2\text{O} - \text{T}_2\text{O}$ [128]                          |          | 230                                                       | 0,9989   | 70                                                                            | 1,037    | 70                                                                      | 1,047    |
| -120                                                                      | 1,0035   | 240                                                       | 0,9958   | 80                                                                            | 1,038    | 80                                                                      | 1,060    |
| -115                                                                      | 1,0048   | $\text{H}_2^{16}\text{O} - \text{H}_2^{18}\text{O}$ [129] |          | 90                                                                            | 1,039    | 90                                                                      | 1,055    |
| -110                                                                      | 1,0060   | 20                                                        | 1,113    | 100                                                                           | 1,039    | 100                                                                     | 1,049    |
| -105                                                                      | 1,0072   | 30                                                        | 1,096    | 110                                                                           | 1,039    | 110                                                                     | 1,043    |
| <b>Бор треххлористый</b>                                                  |          | 40                                                        | 1,076    | <b>Изомасляная кислота</b>                                                    |          | 115                                                                     | 1,040    |
| $^{11}\text{BCl}_3 - ^{10}\text{BCl}_3$ [126]                             |          | 50                                                        | 1,064    | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2 - \text{C}_4\text{D}_8\text{O}_2$ [122]       |          | <b>Метан</b>                                                            |          |
| -85                                                                       | 0,9988   | 60                                                        | 1,052    | 50                                                                            | 1,015    | $\text{CD}_4 - \text{CH}_4$ [135]                                       |          |
| -80                                                                       | 0,9991   | $\text{H}_2^{16}\text{O} - \text{H}_2^{18}\text{O}$ [129] |          | 60                                                                            | 1,022    | -182,7                                                                  | 1,0130   |
| -70                                                                       | 0,9997   | 20                                                        | 1,0093   | 70                                                                            | 1,029    | $^{12}\text{CH}_4 - ^{13}\text{CH}_4$ [131]                             |          |
| -60                                                                       | 1,0002   | 30                                                        | 1,0085   | 80                                                                            | 1,035    | -182,7                                                                  | 1,0114   |
| -50                                                                       | 1,0007   | 40                                                        | 1,0077   | 90                                                                            | 1,041    | -180                                                                    | 1,0112   |
| -40                                                                       | 1,0012   | 50                                                        | 1,0069   | <b>Изопропиловый спирт</b>                                                    |          | -175                                                                    | 1,0108   |
| -30                                                                       | 1,0016   | 60                                                        | 1,0062   | $\text{C}_3\text{D}_8\text{O} - \text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ [122]           |          | -170                                                                    | 1,0105   |
| -20                                                                       | 1,0020   | 70                                                        | 1,0055   | 15                                                                            | 1,065    | -165                                                                    | 1,0102   |
| -10                                                                       | 1,0023   | 80                                                        | 1,0049   | 20                                                                            | 1,062    | -161,3                                                                  | 1,0098   |
| 0,0                                                                       | 1,0026   | 90                                                        | 1,0043   | 30                                                                            | 1,055    | <b>Метиловый спирт</b>                                                  |          |
| 10                                                                        | 1,0029   | 100                                                       | 1,0037   | 40                                                                            | 1,048    | $^{13}\text{CH}_4\text{O} - ^{12}\text{CH}_4\text{O}$ [124]             |          |
| 12,7                                                                      | 1,0030   | 110                                                       | 1,0032   | 50                                                                            | 1,042    | 34,6                                                                    | 1,0002   |
| <b>n-Бутиловый спирт</b>                                                  |          | 120                                                       | 1,0027   | 60                                                                            | 1,037    | <b>Неон</b>                                                             |          |
| $\text{C}_4\text{D}_{10}\text{O} - \text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ [121] |          | 130                                                       | 1,0022   | 70                                                                            | 1,033    | $^{20}\text{Ne} - ^{22}\text{Ne}$ [136]                                 |          |
| 20                                                                        | 1,063    | 140                                                       | 1,0018   | 80                                                                            | 1,029    | -256,74                                                                 | 1,131    |
| 30                                                                        | 1,059    | 150                                                       | 1,0013   | <b>Кислород</b>                                                               |          | -256                                                                    | 1,115    |
| 40                                                                        | 1,054    | 160                                                       | 1,0009   | $^{16}\text{O}_2 - ^{18}\text{O}_2$ [132]                                     |          | -255                                                                    | 1,103    |
| 50                                                                        | 1,050    | 170                                                       | 1,0005   | -210                                                                          | 1,0131   | -254                                                                    | 1,092    |
| 60                                                                        | 1,046    | 180                                                       | 1,0001   | -205                                                                          | 1,0121   | -253                                                                    | 1,085    |
| 70                                                                        | 1,042    | 190                                                       | 0,9998   | -200                                                                          | 1,0112   | -252                                                                    | 1,078    |
| 80                                                                        | 1,038    | 200                                                       | 0,9994   | -195                                                                          | 1,0105   | -251                                                                    | 1,071    |
| 90                                                                        | 1,034    | 210                                                       | 0,9991   | -190                                                                          | 1,0098   | -250                                                                    | 1,066    |
| 100                                                                       | 1,031    | $\text{H}_2^{16}\text{O} - \text{H}_2^{17}\text{O}$ [130] |          | -185                                                                          | 1,0092   | -249                                                                    | 1,061    |
| <b>Вода</b>                                                               |          | 52                                                        | 1,0039   | -182,97                                                                       | 1,0089   | -248                                                                    | 1,046    |
| $\text{H}_2\text{O} - \text{D}_2\text{O}$ [127]                           |          | 73                                                        | 1,0030   | <b>Криптон</b>                                                                |          | -247                                                                    | 1,043    |
| 0,0                                                                       | 1,255    | <b>Водород хлористый</b>                                  |          | $^{82}\text{Kr} - ^{86}\text{Kr}$ [133]                                       |          | -246                                                                    | 1,040    |
| 10                                                                        | 1,182    | $\text{H}^{35}\text{Cl} - \text{H}^{37}\text{Cl}$ [131]   |          | -152                                                                          | 1,00048  | -245                                                                    | 1,038    |
| 20                                                                        | 1,154    | -105                                                      | 1,0021   | <b>Ксенон</b>                                                                 |          | -244                                                                    | 1,036    |
| 30                                                                        | 1,137    | -100                                                      | 1,0019   | $^{130}\text{Xe} - ^{136}\text{Xe}$ [133]                                     |          | -243                                                                    | 1,034    |
| 40                                                                        | 1,122    | -95                                                       | 1,0017   | $^{130}\text{Xe} - ^{136}\text{Xe}$ [133]                                     |          | <b>Пентаборан</b>                                                       |          |
| 50                                                                        | 1,107    | -90                                                       | 1,0015   | -108                                                                          | 1,0001   | $\text{B}_5\text{D}_9 - \text{B}_5\text{H}_9$ [93]                      |          |
| 60                                                                        | 1,094    | <b>Диборан</b>                                            |          | <b>Литий</b>                                                                  |          | -45                                                                     | 1,0656   |
| 70                                                                        | 1,081    | $\text{B}_2\text{D}_6 - \text{B}_2\text{H}_6$ [74]        |          | $^6\text{Li} - ^7\text{Li}$ [134]                                             |          | -40                                                                     | 1,0634   |
| 80                                                                        | 1,071    | -155                                                      | 1,0525   | 400                                                                           | 1,060    | -30                                                                     | 1,0593   |
| 90                                                                        | 1,061    | -150                                                      | 1,0495   | 450                                                                           | 1,047    | -20                                                                     | 1,0555   |
| 100                                                                       | 1,052    | -140                                                      | 1,0456   | 500                                                                           | 1,036    | -10                                                                     | 1,0521   |
| 110                                                                       | 1,045    | -130                                                      | 1,0439   | 550                                                                           | 1,026    | 0,0                                                                     | 1,0489   |
| 120                                                                       | 1,038    | -120                                                      | 1,0442   |                                                                               |          | 10                                                                      | 1,0460   |
| 130                                                                       | 1,032    | -110                                                      | 1,0449   |                                                                               |          | 20                                                                      | 1,0434   |
| 140                                                                       | 1,027    | -100                                                      | 1,0478   |                                                                               |          | 30                                                                      | 1,0409   |
| 150                                                                       | 1,022    | -90                                                       | 1,0516   |                                                                               |          |                                                                         |          |
| 160                                                                       | 1,018    |                                                           |          |                                                                               |          |                                                                         |          |
| 170                                                                       | 1,014    |                                                           |          |                                                                               |          |                                                                         |          |
| 180                                                                       | 1,011    |                                                           |          |                                                                               |          |                                                                         |          |

| $t, ^\circ\text{C}$                                                 | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                                              | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                  | $\alpha$ | $t, ^\circ\text{C}$                                                                             | $\alpha$ |
|---------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 40                                                                  | 1,0387   | <b>Углерод четыреххлористый</b>                                                                  |          | <b>Циклогексан</b>                                                   |          | <i>цис</i> -C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> D <sub>2</sub> -C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [141]   |          |
| 50                                                                  | 1,0366   | <sup>13</sup> CCl <sub>4</sub> - <sup>12</sup> CCl <sub>4</sub> [124]                            |          | C <sub>6</sub> D <sub>12</sub> -C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> [123] |          | —160                                                                                            | 1,0030   |
| 60                                                                  | 1,0347   | 34,6                                                                                             | 1,0013   | 10                                                                   | 1,0933   | —150                                                                                            | 1,0064   |
| <b>Сернистый газ</b>                                                |          | <b>Уксусная кислота</b>                                                                          |          | 20                                                                   | 1,0903   | —140                                                                                            | 1,0095   |
| <sup>32</sup> SO <sub>2</sub> - <sup>35</sup> SO <sub>2</sub> [137] |          | C <sub>2</sub> D <sub>4</sub> O <sub>2</sub> -C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> [139] |          | 30                                                                   | 1,0877   | —130                                                                                            | 1,0121   |
| —35                                                                 | 1,0018   | 20                                                                                               | 1,0457   | 40                                                                   | 1,0837   | —120                                                                                            | 1,0136   |
| <b>Сероводород</b>                                                  |          | 30                                                                                               | 1,0450   | 50                                                                   | 1,0809   | —110                                                                                            | 1,0146   |
| H <sub>2</sub> <sup>32</sup> S-H <sub>2</sub> <sup>35</sup> S [137] |          | 40                                                                                               | 1,0440   | 60                                                                   | 1,0774   | —100                                                                                            | 1,0153   |
| —76                                                                 | 1,0055   | 50                                                                                               | 1,0438   | 70                                                                   | 1,0744   | —90                                                                                             | 1,0157   |
| —65                                                                 | 1,0058   | 60                                                                                               | 1,0432   | <b>Этилен</b>                                                        |          | <i>транс</i> -C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> D <sub>2</sub> -C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [141] |          |
| <b>Углерода окись</b>                                               |          | 70                                                                                               | 1,0427   | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> D-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [140]  |          | —160                                                                                            | 1,0047   |
| <sup>12</sup> CO- <sup>13</sup> CO [138]                            |          | 80                                                                                               | 1,0423   | —154,88                                                              | 1,0024   | —150                                                                                            | 1,0085   |
| —204                                                                | 1,0130   | 90                                                                                               | 1,0418   | —150                                                                 | 1,0033   | —140                                                                                            | 1,0112   |
| —200                                                                | 1,0119   | 100                                                                                              | 1,0414   | —140                                                                 | 1,0046   | —130                                                                                            | 1,0131   |
| —195                                                                | 1,0106   | 110                                                                                              | 1,0410   | —130                                                                 | 1,0055   | —120                                                                                            | 1,0143   |
| —190                                                                | 1,0094   | 120                                                                                              | 1,0406   | —120                                                                 | 1,0062   | —110                                                                                            | 1,0153   |
| —185                                                                | 1,0084   | 125                                                                                              | 1,0405   | —110                                                                 | 1,0067   | —100                                                                                            | 1,0159   |
| —180                                                                | 1,0075   | <b>Хлороформ</b>                                                                                 |          | —100                                                                 | 1,0070   | —90                                                                                             | 1,0162   |
| —175                                                                | 1,0067   | <sup>13</sup> CH <sub>3</sub> Cl- <sup>12</sup> CH <sub>3</sub> Cl [124]                         |          | —91,85                                                               | 1,0071   | <i>гем</i> -C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> D <sub>2</sub> -C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [141]   |          |
| —170                                                                | 1,0059   | 34,6                                                                                             | 1,0008   |                                                                      |          | —160                                                                                            | 1,0032   |
|                                                                     |          |                                                                                                  |          |                                                                      |          | —150                                                                                            | 1,0084   |
|                                                                     |          |                                                                                                  |          |                                                                      |          | —140                                                                                            | 1,0096   |
|                                                                     |          |                                                                                                  |          |                                                                      |          | —130                                                                                            | 1,0123   |
|                                                                     |          |                                                                                                  |          |                                                                      |          | —120                                                                                            | 1,0138   |
|                                                                     |          |                                                                                                  |          |                                                                      |          | —110                                                                                            | 1,0148   |
|                                                                     |          |                                                                                                  |          |                                                                      |          | —100                                                                                            | 1,0155   |
|                                                                     |          |                                                                                                  |          |                                                                      |          | —90                                                                                             | 1,0159   |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ривкин С. Л., Алексидров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник, М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Чайхорский А. А. Химия нептуния. М.: Атомиздат, 1978.
3. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. академика И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
4. Carniglia S. C., Gunningham B. B.//J. Amer. Chem. Soc. 1955. Vol. 77. № 6. P. 1502—1509.
5. Erway N. D., Simpson O. C.//J. Chem. Phys. 1960. Vol. 18. P. 983—984.
6. Green J. W. Ibid. 1964. Vol. 41, № 8. P. 2245—2249.
7. Шукарев С. А., Семенов Г. А.//Журн. неорганической химии. 1957. Т. 2, Вып. 6. С. 1217—1220.
8. Blauer J. A., Greenbaum M. A., Farber M.//J. Phys. Chem. 1965. Vol. 69, № 3. P. 1069—1073.
9. Greenbaum M. A., Foster J. N., Arin M. L. e. a.//Ibid. 1963. Vol. 67, № 1. P. 36—41.
10. Greenbaum M. A., Yates R. E., Farber M.//Ibid. 1963. Vol. 67, № 9. P. 1802—1803.
11. Soulen J. R., Sthapitanonda P., Margrave J. L.//Ibid. 1955. Vol. 59, № 2. P. 132—133.
12. Darnell A. J., Yosim S. J.//Ibid. 1959. Vol. 63, № 11. P. 1813—1821.
13. Blackburn P. E., Hoch M., Jonston H. L.//Ibid. 1958. Vol. 62, № 7. P. 769—771.
14. Smith F. J., Barrow R. F.//Trans. Faraday Soc. 1958. Vol. 54, № 426. P. 826—828.
15. Шукарев С. А., Семенов Г. А., Ратьковский И. А.

//Журн. неорганической химии. 1961. Т. 6. Вып. 8. С. 1973—1975.

16. Лю Цюнь-Хуа, Пашилкин А. С., Новоселова А. В.//Там же. 1962. Т. 7. Вып. 5. С. 963—964.
17. Давыдов В. И., Диев Н. П.//Там же. 1957. Т. 2. Вып. 9. С. 2003—2004.
18. Chikara Hirata//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66, № 8. P. 1563.
19. Habermann C. E., Daane A. H.//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 41, № 9. P. 2818—2821.
20. Maclaren R. O., Gregory N. W.//J. Phys. Chem. 1955. Vol. 59, № 2. P. 184—186.
21. Sime R. J., Gregory N. W.//J. Phys. Chem. 1960. Vol. 64, № 1. P. 86—87.
22. Шукарев С. А., Семенов Г. А., Ратьковский И. А. и др.//Журн. общ. химии. 1961. Т. 31. Вып. 7. С. 2090—2092.
23. Ackermann R. J., Rauh E. G.//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36, № 2. P. 448—449.
24. Пашилкин А. С., Дробот Д. В., Шевцова З. Н. и др.//Журн. неорганической химии. 1962. Т. 7. Вып. 12. С. 2811—2812.
25. Bloom H., Bockris O'M., Richards N. E. e. a.//J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, № 9. P. 2044—2046.
26. Pugh A. C. P., Barrow R. F.//Trans. Faraday Soc. 1958. Vol. 54. Part 5, № 425. P. 671—673.
27. Schulz D. A., Searcy A. W.//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 1. P. 103—104.
28. Blue C. D.//Ibid. 1963. Vol. 67, № 4. P. 877—879.
29. Hildenbrand D. L., Potter N. D.//Ibid. 1963. Vol. 67, № 10. P. 2231—2233.

30. Bautista R. G., Margrave J. L.//Ibid. 1963. Vol. 67, № 11. P. 2411—2417.
31. Hidenbrand D. L., Potter N. D.//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 40, № 10. P. 2882—2884.
32. Eick H. A., Mulford R. N. R.//Ibid. 1964. Vol. 41, № 5. P. 1475—1479.
33. Farber M., Meyer R. T., Margrave J. L.//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 7. P. 883—884.
34. Нестерова Я. М., Пашинкин А. С., Новоселова А. В.//Журн. неорганической химии. 1961. Т. 6. Вып. 9. С. 2014—2017.
35. Hirayama C., Ichikawa Y., De Roo A. M.//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 5. P. 1039—1042.
36. Dreger L. H., Margrave J. L.//Ibid. 1960. Vol. 64, № 9. P. 1323—1326.
37. Zavitsano P. D.//Ibid. 1964. Vol. 68, № 10. P. 2899.
38. Phipps T. E.//Доклад № 735 на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955.
39. Ruf R., Treadwell W. D.//Helv. Chim. Acta. 1954. Vol. 37, № 7. P. 1941—1944.
40. Зломанов В. П., Поповкин Б. А., Новоселова А. В.//Журн. неорганической химии. 1959. Т. 4. Вып. 12. С. 2661—2663.
41. Пашинкин А. С., Новоселова А. В.//Там же, 1959. Т. 4. Вып. 2. С. 2657—2659.
42. Жиганова Г. М., Румянцев Ю. В., Болондз Ф. М.//Тр. Восточно-Сибирского филиала СО АН СССР. 1962. Вып. 41. С. 121—124.
43. Spedding F. H.//Trans. Amer. Soc. Metals. 1960. Vol. 218. P. 608—611.
44. Krikorian O. H.//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 8. P. 1586—1590.
45. Карелин В. В., Несмеянов А. Н., Приселков Ю. А.//Докл. АН СССР. 1962. Т. 144, № 2. С. 352—355.
46. Геков Л. Х., Несмеянов А. Н., Приселков Ю. А.//Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1962. № 5. С. 34—35.
47. Шахтахтинский М. Г., Кулиев А. А.//Докл. АН СССР. 1958. Т. 123, № 6. С. 1071—1074.
48. Зломанов В. П., Поповкин Б. А.//Журн. неорганической химии. 1958. Т. 3. Вып. 7. С. 1473—1476.
49. Franzen H. F., Gills P. W.//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 42, № 3. P. 1033—1039.
50. Darnell A. J., Kepeshca F. J.//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 9. P. 1143—1144.
51. Справочник химика/Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия, 1971. Т. 1.
52. Щукарев С. А., Василькова И. В., Ефимов А. И.//Журн. неорганической химии. 1956. Т. 1. Вып. 10. С. 2272—2277.
53. Sime R. J., Gregory N. W.//J. Amer. Chem. Soc. 1960. Vol. 82, № 4. P. 800—801.
54. Allen T. L.//Ibid. 1956. Vol. 78, № 21. P. 5476—5477.
55. Scheer M. D., Fine J.//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36, № 6. P. 1647—1648.
56. Несмеянов А. Н., Сазонов Л. А.//Журн. неорганической химии. 1960. Т. 5. Вып. 3. С. 519—520.
57. Ahman D. H.//U. S. Atomic Energy Commission AEC-D. № 3205. P. 1951—1956.
58. Круглих А. А., Павлов В. С.//Укр. физ. журн. 1965. Т. 10, № 9. С. 1029—1031.
59. Несмеянов А. Н., Иофа Б. З., Стрельников А. А.//Журн. физ. химии. 1958. Т. 32, № 4. С. 955—957.
60. Pierce L., Pace E. L.//J. Chem. Phys. 1955. Vol. 23, № 3. P. 551—553.
61. Баймаков А. Ю.//Тр. Ленингр. политехн. ин-та. 1957. № 188. С. 156—159.
62. Sherman R. H., Glaugue W. F.//J. Amer. Chem. Soc. 1955. Vol. 77, № 8. P. 2154—2156.
63. Новиков Г. И., Гаврюченков Ф. Г.//Журн. неорганической химии. 1964. Т. 9. Вып. 2. С. 475—477.
64. Andersen H. C., Belz L. H.//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 19. P. 4828—4829.
65. Rogers M. T., Speirs J. L.//J. Phys. Chem. 1956. Vol. 60, № 10. P. 1462—1464.
66. Verne L., Trevor E.//Ibid. 1958. Vol. 62, № 3. P. 362—363.
67. Рубан И. Н., Пономарев В. Д.//Тр. Ин-та металлургии и обогащения АН КазССР. 1962. Т. 5. С. 34—36.
68. Щукарев С. А., Суворов А. В.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1961. № 4. С. 87—88.
69. Щукарев С. А., Новиков Г. И., Коковин Г. А.//Журн. неорганической химии. 1959. Т. 4. Вып. 10. С. 2185—2188.
70. Щукарев С. А., Новиков Г. И., Андреева Н. В.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1959. № 4. С. 120—122.
71. Сун Инь-Чжу, Морозов И. С.//Журн. неорганической химии. 1959. Т. 4. Вып. 2. С. 492—493.
72. Palko A. A., Ryan A. D., Kuhn D. W.//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 3. P. 319—321.
73. Gibbs S. G., Shapiro J.//J. Chem. Phys. 1959. Vol. 30, № 6. P. 1483—1485.
74. Ditter J. F., Perrine J., Shapiro J.//J. Chem. Engng. Data. 1961. Vol. 6, № 2. P. 271—272.
75. Clarke J. T., Rifkin E. B., Johnston H. L.//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 4. P. 781—785.
76. Wirth H. E., Palmer E. D.//J. Phys. Chem. 1956. Vol. 60, № 7. P. 911—913.
77. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.
78. Поляченко О. Г., Новиков Г. И.//Журн. неорганической химии. 1963. Т. 8. Вып. 12. С. 2631—2634.
79. MacLaren R. O., Gregory N. W.//J. Phys. Chem. 1955. Vol. 59, № 2. P. 184—186.
80. Фадеев В. Н., Федоров П. И.//Журн. неорганической химии. 1963. Т. 8. Вып. 8. С. 2007—2008.
81. Исакова Р. И., Нестеров В. Н., Шендяпин А. С.//Там же. 1963. Т. 8. Вып. 1. С. 18—21.
82. Толмачева Т. А., Андриновская Т. Л.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1960. № 10. С. 131—134.
83. Bloom H., Welch B. J.//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 12. P. 1594—1595.
84. Long L. H., Cattanaeh J.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1961. Vol. 20, № 3/4. P. 340—341.
85. Li J. C. M.//J. Amer. Chem. Soc. 1956. Vol. 78, № 6. P. 1081—1083.
86. Щукарев С. А., Василькова И. В., Шарунин Б. Н.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1961. № 22. С. 130—131.
87. Девярых Г. Г., Фролов И. А.//Журн. неорганической химии. 1963. Т. 8. Вып. 2. С. 265—268.
88. Cubicciotti D., Eding H.//J. Phys. Chem. 1965. Vol. 69, № 8. P. 2743—2744.
89. Исакова А. И., Нестеров В. Н.//Тр. Ин-та металлургии и обогащения АН КазССР. 1962. Т. 5. С. 29—30.
90. Бердоносос С. С., Лапицкий А. В., Баков Е. К.//Журн. неорганической химии. 1965. Т. 10. Вып. 2. С. 322—324.
91. Тарасенков Д. Н., Командин А. В.//Журн. общ. химии. 1940. Т. 10. Вып. 14. С. 1319—1320.
92. Клушин Д. Н., Черных В. Я.//Журн. неорганической химии. 1960. Т. 5. Вып. 7. С. 1409—1412.
93. Shapiro I., Ditter T. F.//J. Chem. Phys. 1957. Vol. 26, № 4. P. 798—801.
94. Kochler J. K., Glaugue W. F.//J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, № 11. P. 2659—2662.
95. Jarry R. L.//J. Phys. Chem. 1957. Vol. 61, № 4. P. 498—499.
96. Weinstock B., Malm J., Wealer E. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1961. Vol. 83, № 21. P. 4310—4317.
97. Malm J. G., Selig H.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1961. Vol. 20, № 3/4. P. 189—190.

98. Барышников Н. В., Зеликман А. Н., Теслицкая М. В.//Журн. неорган. химии. 1962. Т. 7. Вып. 11. С. 2634—2635.
99. Никольский А. Б.//Там же. 1963. Т. 8. Вып. 5. С. 1045—1048.
100. Никольский А. Б.//Там же. 1965. Т. 10. Вып. 1. С. 290—291.
101. Зорин А. Д., Девярых Г. Г., Крупнова Э. Ф. и др.//Там же. 1964. Т. 9. Вып. 10. С. 2280—2283.
102. Berka L.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1960. Vol. 14, № 3/4. P. 190—192.
103. Шукарев С. А., Курбанов А. Р.//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1962. № 10. С. 144—145.
104. Кудрявцев А. А., Устюгов Г. П.//Журн. неорган. химии, 1961. Т. 6. Вып. 11. С. 2421—2422.
105. Кудрявцев А. А., Устюгов Г. П.//Тр. Моск. химико-технологич. ин-та им. Д. И. Менделеева. 1962. Вып. 38. С. 42—44.
106. Machol R. E., Westrum E. F.//J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, № 12. P. 2950—2952.
107. Selig H., Malm J. G.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1962. Vol. 24, № 11. P. 641—643.
108. Smith W. T., Cobble J. W., Boyd G. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 23. P. 5773—5774.
109. Pace E. L., Turnbull V. F.//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43, № 6. P. 1953—1955.
110. Pike F. P., Foster C. T.//J. Chem. Engng. Data. 1959. Vol. 4, № 4. P. 305—307.
111. McDougall L. A., Kilpatrick J. E.//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 42, № 7. P. 2311—2321.
112. Langer S., Blaukenspir F. F.//J. Inorg. Nucl. Chem. 1960. Vol. 14, № 1/2. P. 26—28.
113. Kenesha F. J., Cubissioti D.//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 40, № 1. P. 191—199.
114. Нестеров В. Н., Пономарев В. Д.//Изв. АН КазССР. Сер. Металлургия, обогащение и огнеупоры. 1959. Вып. 1(4). С. 80—82.
115. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
116. Малышев В. В.//Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. С. 743—748.
117. Comité Consultatif de Thermometrie. 14 Session, 1982. Recommendation T1. P. T85—T86.
118. Малышев В. В.//Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. С. 1010—1016.
119. Clegg H. P., Rowlinson J. S., Sutton J. R.//Trans. Farad. Soc. 1955. Vol. 51. P. 1327—1329.
120. Малышев В. В.//Атомная энергия. 1973. Т. 34. С. 42—45.
121. Begun G. M.//J. Chem. Phys. 1956. Vol. 25, № 6. P. 1279—1280.
122. Рабинович Н. Б., Соколов Н. Н., Артюхин П. И.//Докл. АН СССР. 1955. Т. 105, № 4. С. 762—763.
123. Davis R. T., Schisser R. W.//J. Phys. Chem. 1953. Vol. 57, № 9. P. 966—969.
124. Baerstschi F.//Nature. 1953. Vol. 171. P. 1018—1020.
125. Севрюгова Н. Н., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.//Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 5. С. 1004—1005.
126. Севрюгова Н. Н., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.//Докл. АН СССР. 1959. Т. 126, № 5. С. 1044—1045.
127. Теплофизические свойства веществ: Справочник/Под ред. Н. Б. Варгафтика. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1956.
128. Smith H. A., Fith K. R.//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 4. P. 920—921.
129. Уваров О. В., Соколов Н. М., Жаворонков Н. М.//Журн. физ. химии. 1962. Т. 36, № 12. С. 2699—2702.
130. Borowitz J. L.//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66, № 8. P. 1412—1414.
131. Матвеев К. И., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.//Докл. АН СССР. 1959. Т. 125, № 3. С. 580—581.
132. Девярых Г. Г., Зорин А. Д.//Журн. физ. химии. 1956. Т. 30. Вып. 5. С. 1133—1135.
133. Григорьев В. Н.//Там же. 1962. Т. 36. Вып. 8. С. 1779—1780.
134. Катальников С. Г., Андреев Б. М.//Атомная энергия. 1961. Т. 11. С. 240—243.
135. Armstrong G.//J. Chem. Phys. 1953. Vol. 21. P. 1293—1296.
136. Bigeleisen J., Roth E.//Ibid. 1961. Vol. 35, № 1. P. 68—70.
137. Девярых Г. Г., Сулюев Ю. Н., Зорин А. Д.//Тр. Моск. химико-технологического ин-та по химии и хим. технологии. 1958. Вып. 1. С. 24—26.
138. Севрюгова Н. И., Жаворонков Н. М.//Докл. АН СССР. Т. 134, № 4. С. 875—876.
139. Potter A. E., Ritter H. L.//J. Phys. Chem. 1954. Vol. 58, № 11. P. 1040—1044.
140. Bigeleisen J., Stern M. J., Von Hook W. A.//J. Chem. Phys. 1963. Vol. 38, № 2. P. 497—504.
141. Bigeleisen J., Ribinkar S. V., Von Hook W. A.//Ibid. 1963. Vol. 38, № 2. P. 489.

## ГЛАВА 12 ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ

Э. Б. Гельман

### 12.1 ВВЕДЕНИЕ

Переход вещества из твердого состояния в жидкое называется плавлением; переход из конденсированного (твердого или жидкого) состояния в газообразное (пар) — испарением. В естественных условиях плавление является равновесным процессом; испарение становится равновесным, если внешнее давление равно давлению пара. Равновесное испарение из жидкого состояния называется кипением, из твердого — сублимацией (возгонкой).

Процессы плавления, кипения и сублимации совершаются с поглощением теплоты, которая называется соот-

ветственно теплотой плавления  $\Delta H_{пл}$ , кипения  $\Delta H_{кип}$  и сублимации  $\Delta H_{субл}$  данного вещества.

### 12.2. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Плавление, кипение и сублимация чистых веществ при постоянном давлении происходят при некоторой характерной для данного вещества температуре, называемой температурой плавления  $T_{пл}$ , кипения  $T_{кип}$  и сублимации  $T_{субл}$  вещества. В табл. 12.1—12.3 приведены температура и теплота плавления и кипения (или сублимации) при нормальном давлении для элементов, неорганических и органических соединений.

Таблица 12.1. Температура  $t$ , °С, и теплота плавления и кипения (или сублимации)  $\Delta H$ , кДж/моль, элементов и некоторых изотопов при нормальном давлении 101 325 Па. Выделены значения, разброс которых по различным источникам превышает 10%

| Элемент                                    | $t_{\text{пл}}$   | $\Delta H_{\text{пл}}$                                              | $t_{\text{кип}}$ , $t_{\text{субл}}$ | $\Delta H_{\text{кип}}$ , $\Delta H_{\text{субл}}$ | Литература |
|--------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|------------|
| Азот, $N_2$                                | —210,012          | 0,7207 [4]                                                          | —195,812                             | 5,59 [10]                                          | [10]       |
| Азот, $^{15}N_2$                           | —210,96 [12]      | 0,7205                                                              | —195,76                              | 5,592                                              | [4]        |
| Азот, $^{14}N_2$                           | —210,01           | —                                                                   | —                                    | —                                                  | [12]       |
| Активный                                   | 1050              | 12                                                                  | 3297 [10]                            | 378                                                | [1]        |
| Алюминий                                   | 660,24 [10]       | 10,8                                                                | 2520                                 | 293                                                | [1]        |
| Америций                                   | 1180              | 14,4                                                                | $\approx 2400$ [11]                  | 230                                                | [1]        |
| Аргон                                      | —189,30           | 1,190                                                               | —185,9                               | 6,5                                                | [1]        |
| Астат                                      | 302               | 8,8 [6]                                                             | 334                                  | 90,4 [4]                                           | [11]       |
| Барий                                      | 727               | 7,53 [6]                                                            | 1640 [9]                             | 139                                                | [1]        |
| Бериллий                                   | 1287              | 13                                                                  | 2471                                 | 291                                                | [1, 11]    |
| Бор                                        | 2075              | 23                                                                  | 3700                                 | 512                                                | [1]        |
| Бром, $Br_2$                               | 7,25              | 10,57                                                               | 59,2                                 | 29,5                                               | [1]        |
| Ванадий                                    | 1917              | 17,6 [6]                                                            | 3392                                 | 445 [1]                                            | [11]       |
| Висмут                                     | 217,4             | 11,0                                                                | 1552                                 | 177                                                | [1]        |
| Водород, $n-H_2$                           | —259,19           | 0,117                                                               | —252,77                              | 0,916                                              | [1]        |
| <i>пара</i> -Водород, <i>пара</i> - $H_2$  | —259,27           | 0,117                                                               | —252,87                              | 0,900                                              | [4]        |
| <i>орто</i> -Водород, <i>орто</i> - $H_2$  | —254,52           | 0,197                                                               | —                                    | —                                                  | [4]        |
| Водородотритий, HT                         | —254,7            | —                                                                   | —249,6                               | —                                                  | [4]        |
| Вольфрам                                   | 3420              | 35,1 [6]                                                            | 5680                                 | 770                                                | [1]        |
| Гадолиний                                  | 1313 [9]          | 10,0                                                                | 3280                                 | 360                                                | [1]        |
| Галлий                                     | 29,78 [4]         | 5,59 [2]                                                            | $\approx 2300$ [9, 11]               | 256                                                | [1]        |
| Гафний                                     | 2230 [10]         | 23,9 [6]                                                            | $\approx 4900$ [9, 11]               | 569                                                | [1]        |
| Гелий, $^4He$                              | —271,4 (3,00 МПа) | 0,007(3,00 МПа)<br>При нормальном давлении твердая фаза отсутствует | —268,934 [9]                         | 0,0837 [4]                                         | [1]        |
| Гелий-3, $^3He$                            | —                 | —                                                                   | —269,95                              | 0,0478<br>(—271,5 °С)                              | [4]        |
| Германий                                   | 237,2             | 37,6 [6]                                                            | 2847 [10]                            | 334                                                | [4]        |
| Гольмий                                    | 1474 [9]          | 12,4 [6]                                                            | 2695 [10]                            | 240 [1]                                            | [1]        |
| <i>n</i> -Дейтерий, <i>n</i> - $D_2$       | —254,42           | 0,197                                                               | —249,9 [10]                          | 1,226 [4]                                          | [4]        |
| <i>орто</i> -Дейтерий, <i>орто</i> - $D_2$ | —                 | —                                                                   | —249,56                              | 1,223                                              | [4]        |
| Дейтероводород, HD                         | —256,5            | 0,1548                                                              | —251,02                              | 1,109(—256,5 °С)                                   | [4]        |
| Дейтеротритий, DT                          | —253,5            | —                                                                   | —248,9                               | —                                                  | [4]        |
| Диспрозий                                  | 1409              | 10,9                                                                | 2562 [9]                             | 228                                                | [1]        |
| Европий                                    | 822 [10]          | 9,2                                                                 | 1597 [10]                            | 147                                                | [1]        |
| Железо                                     | 1538 [10]         | 13,8                                                                | 2872 [11]                            | 350                                                | [1]        |
| Золото                                     | 1063,4            | 12,6                                                                | 2877 [10]                            | 331                                                | [1]        |
| Индий                                      | 156,4             | 3,34 [6]                                                            | 2024                                 | 228                                                | [1]        |
| Иод, $I_2$                                 | 113,6             | 15,77 [4]                                                           | 184,35 [9]                           | 41,8                                               | [1]        |
| Иридий                                     | 2447              | 26,3 [4]                                                            | 4380                                 | 613                                                | [1]        |
| Иттербий                                   | 824               | 7,7                                                                 | 1211                                 | 130                                                | [1]        |
| Иттрий                                     | 1528              | 11                                                                  | 3337 [10]                            | 362                                                | [1]        |
| Кадмий                                     | 320,9 [9]         | 6,2                                                                 | 766,5                                | 99,6                                               | [1]        |
| Калий                                      | 63,5 [10]         | 2,33                                                                | 761                                  | 76,6                                               | [1]        |
| Кальций                                    | 842               | 8,66 [6]                                                            | 1484 [10]                            | 152                                                | [1]        |
| Кислород, $O_2$                            | —218,79 [3]       | 0,4459 [3]                                                          | —182,97                              | 6,833                                              | [1]        |
| Кобальт                                    | 1492              | 16,3                                                                | 2957 [11]                            | 376                                                | [1]        |
| Кремний                                    | 1415 [10]         | 49,8                                                                | 3300                                 | 356                                                | [1]        |
| Криптон                                    | —157,37           | 1,64                                                                | —153,22                              | 9,046                                              | [1]        |
| Ксенон                                     | —111,85           | 2,29                                                                | —107,96 [10]                         | 12,63                                              | [1]        |
| Кюрий                                      | 1340              | —                                                                   | —                                    | —                                                  | [10]       |
| Лантан                                     | 920               | 6,3 [6]                                                             | 3454 [10]                            | 413                                                | [1]        |
| Литий                                      | 180,54 [9]        | 3,0                                                                 | 1347 [9]                             | 138                                                | [1]        |
| Лютеций                                    | 1663 [10]         | 18,8                                                                | 3395 [9]                             | 356                                                | [1]        |
| Магний                                     | 650               | 8,56 [6]                                                            | 1107 [10]                            | 128                                                | [1]        |
| Марганец                                   | 1245              | 12,1 [6]                                                            | 2080                                 | 227                                                | [1]        |
| Медь                                       | 1083              | 13,0                                                                | 2543                                 | 302                                                | [1]        |
| Молибден                                   | 2620              | 36                                                                  | $\approx 4700$ [1, 10]               | 582                                                | [1]        |
| Мышьяк (серый)                             | —                 | Субл.                                                               | 615,0                                | 31,8                                               | [1]        |



| Элемент                     | $t_{пл}$       | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}$ $t_{субл}$    | $\Delta H_{кип}$ $\Delta H_{субл}$ | Литература |
|-----------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|------------------------------------|------------|
| Натрий                      | 97,9           | 2,60 [6]        | 886                     | 90,1                               | [1]        |
| Неодим                      | 1024           | 10,68           | 3080                    | 255                                | [12]       |
| Неон, Ne                    | —248,52        | 0,33            | —245,93                 | 1,79                               | [1, 10]    |
| Неон, $^{20}\text{Ne}$      | —248,49        | 0,331           | —                       | —                                  | [12]       |
| Неон, $^{22}\text{Ne}$      | —248,31        | 0,334           | —                       | —                                  | [12]       |
| Нептуний                    | 637            | 52              | $\approx 4000$ [1, 9]   | 422                                | [1]        |
| Никель                      | 1455           | 17,6            | $\approx 2800$ [9, 11]  | 370                                | [1]        |
| Ниобий                      | 2469 [10]      | 28              | $\approx 4800$ [9, 11]  | 662                                | [1]        |
| Олово (серое)               | 231,97 [9]     | 7,2             | $\approx 2450$ [9, 11]  | 296,1                              | [1]        |
| Осмий                       | 3045           | 31,8 [6]        | 5027                    | 748 [1]                            | [9]        |
| Палладий                    | 1554           | 17              | $\approx 3000$ [9, 10]  | 353                                | [1]        |
| Платина                     | 1772           | 20 [1]          | 3827                    | 511 [1,2]                          | [10]       |
| Плутоний                    | 639,7          | 2,8             | $\approx 3300$          | 351                                | [1, 10]    |
| Полоний                     | 254            | 12,6 [6]        | 962                     | 59                                 | [1]        |
| Празеодим                   | 932            | 6,9             | $\approx 3360$ [9, 10]  | 297                                | [1]        |
| Прометий                    | $\approx 1100$ | 10,5 [6]        | $\approx 2600$          | —                                  | [9, 11]    |
| Протактиний                 | 1572 [10]      | 16,7            | $\approx 3780$ [10, 11] | 481,5                              | [2]        |
| Радий                       | 700            | 9,2 [6]         | $\approx 1320$          | 132 [1]                            | [9, 11]    |
| Радон                       | —71 [10]       | 2,89            | —61,9                   | 16,8                               | [1]        |
| Рений                       | 3180 [10]      | 33,1 [6]        | 5627 [9]                | 716 [8]                            |            |
| Родий                       | 1963           | 21,8 [6]        | $\approx 3680$ [9, 11]  | 496                                | [1]        |
| Ртуть                       | —38,89         | 2,30            | 356,66                  | 59,23                              | [1]        |
| Рубидий                     | 39,49          | 2,19            | 686,04                  | 70                                 | [1, 10]    |
| Рутений                     | 2250           | 24,3 [6]        | $\approx 4050$ [9]      | 602                                | [1]        |
| Самарий                     | 1072           | 8,6             | 1778                    | 166                                | [1]        |
| Свинец                      | 327,44 [10]    | 4,77            | 1745                    | 178                                | [1]        |
| Селен (серый)               | 217            | 6,7 [6]         | 685                     | 29                                 |            |
| Сера ( $\beta$ , моноклин.) | 119,3          | 1,72            | 444,6                   | 9,2                                | [1]        |
| Сера ( $\alpha$ , ромб.)    | 112,8          | —               | 444,6                   | 9,2                                | [1]        |
| Серебро                     | 960,5          | 11,3 [6]        | 2167                    | 251                                | [1]        |
| Скандий                     | 1541           | 14,2 [6]        | 2831 [9]                | 315                                | [1]        |
| Стронций                    | 768            | 8               | 1384 [9]                | 134                                | [1]        |
| Сурьма                      | 630,5          | 20,1            | 1634                    | 124,4                              | [1]        |
| Таллий                      | 303,5          | 4,2             | 1457                    | 162,4                              | [1, 9]     |
| Тантал                      | 2996 [9]       | 35              | $\approx 5350$ [9, 11]  | 745                                | [1]        |
| Теллур                      | 449,8          | 17,5            | 990                     | 51,0                               | [1]        |
| Тербий                      | 1356 [9]       | 10,8            | 3200                    | 331                                | [1]        |
| Технеций                    | 2200           | 24              | $\approx 4260$ [9, 11]  | 593                                | [1]        |
| Титан                       | 1608 [10]      | 15,1            | 3287 [9]                | 410                                | [1]        |
| Торий                       | 1750           | 16,7 [1, 6]     | 4790 [9]                | 540                                | [1]        |
| Тритий, $T_2$               | —252,53        | 0,23            | —248,11                 | 1,39                               | [1]        |
| Туллий                      | 1545           | 16,9            | $\approx 1840$ [9, 11]  | 191                                | [1]        |
| Углерод (графит)            |                | Субл.           | 4200                    | —                                  | [10]       |
| Уран                        | 1134           | 9,2             | $\approx 4030$ [1, 10]  | 494                                | [1]        |
| Фосфор (белый)              | 44,1           | 0,66            | 257                     | 13,1                               | [1]        |
| Фосфор (красный)            |                | Субл.           | 429                     | 29,8                               | [1]        |
| Фосфор (черный)             |                | Субл.           | 453                     | —                                  | [1]        |
| Франций                     | 26,84 [10]     | 2,1 [6]         | 677                     | 64                                 | [9]        |
| Фтор, $F_2$                 | —219,6         | 0,510           | —188,13                 | 6,54                               | [1]        |
| Хлор, $Cl_2$                | —101,03        | 6,61            | —34,1                   | 20,41                              | [1]        |
| Хром                        | 1877 [10]      | 16,3 [6]        | 2672 [9]                | 338                                | [1]        |
| Цезий                       | 28,5           | 2,10            | 672                     | 67                                 | [1]        |
| Церий                       | 799            | 5,2 [1]         | $\approx 3340$ [9, 10]  | 409 [1]                            | [9]        |
| Цинк                        | 419,5          | 7,2             | 906,2                   | 115,3                              | [1]        |
| Цирконий                    | 1852 [10]      | 14,6            | 4340                    | 558                                | [1]        |
| Эрбий                       | 1525           | 19,9            | $\approx 2690$ [9, 10]  | 261                                | [1]        |
| Эйнштейний                  | 860            | —               | —                       | —                                  | [10]       |

Таблица 12.2. Температура  $t$ , °C, и теплота плавления и кипения  $\Delta H$ , кДж/моль, неорганических соединений при нормальном давлении 101 325 Па. Обозначения: пл — плавление, кип — кипение, субли. — сублимация (возгонка), взр. — взрывается, разл. — разлагается [1]

| Вещество                          | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}^*$<br>$t_{субли}$ | $\Delta H_{кип}^*$<br>$\Delta H_{субли}$ | Лите-<br>ратура | Вещество                                     | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}^*$<br>$t_{субли}$ | $\Delta H_{кип}^*$<br>$\Delta H_{субли}$ | Лите-<br>ратура |
|-----------------------------------|--------------|-----------------|----------------------------|------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|----------|-----------------|----------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| AcBr <sub>3</sub>                 | —            | субли.          | 800                        | —                                        | —               | B <sub>3</sub> N <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | —58      | —               | 55                         | 29,3                                     | —               |
| AcCl <sub>3</sub>                 | 802          | 36,0            | 1760                       | 188                                      | [2]             | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 450      | 24,6            | 2124                       | 356,3                                    | [3]             |
| AcF <sub>3</sub>                  | 1327         | 33,4            | 2277                       | 251                                      | [2]             | BaBr <sub>2</sub>                            | 857      | 32,2            | 1980                       | 232                                      | —               |
| Ac <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 1977         | 83,7            | —                          | —                                        | [2, 3]          | BaCO <sub>3</sub>                            | —        | —               | 1400 (разл.)               | —                                        | —               |
| AgBr                              | 424          | 8,8             | 1502                       | 198                                      | [4]             | BaCl <sub>2</sub>                            | 960      | 15,9            | 2050                       | 241                                      | —               |
| AgCN                              | 350          | 11,5            | —                          | —                                        | —               | BaF <sub>2</sub>                             | 1370     | 17,6            | 2250                       | 271                                      | —               |
| AgCl                              | 455          | 13,2            | 1557                       | 184                                      | [5]             | BaH <sub>2</sub>                             | 1200     | 25              | —                          | —                                        | —               |
| AgClO <sub>3</sub>                | 231          | —               | 270 (разл.)                | —                                        | —               | BaI <sub>2</sub>                             | 711      | —               | 1900                       | —                                        | —               |
| AgF                               | 435          | 17              | 1147                       | 142                                      | [2]             | BaMoO <sub>4</sub>                           | 1460     | —               | 1730                       | —                                        | —               |
| AgF <sub>2</sub>                  | 690          | 18,4            | 1227                       | 150,5                                    | [2]             | BaO                                          | 1923     | 57,7            | 2727                       | 259,6                                    | [3, 4]          |
| AgI                               | 554          | 9,4             | 1506                       | 143,9                                    | [4]             | BaO <sub>2</sub>                             | 450      | 23,9            | 837 (разл.)                | —                                        | [2, 3]          |
| AgNO <sub>3</sub>                 | 209          | 12,1            | 300 (разл.)                | —                                        | —               | Ba <sub>2</sub> O                            | 607      | 21,8            | 767                        | 83,7                                     | [3]             |
| Ag <sub>2</sub> O                 | 110 (взр.)   | —               | —                          | —                                        | —               | Ba(OH) <sub>2</sub>                          | 408      | 15              | —                          | 290                                      | —               |
| Ag <sub>2</sub> O                 | 187          | 15,5 (разл.)    | —                          | —                                        | [3]             | BaS                                          | >2200    | —               | 3000                       | 435                                      | [2, 7]          |
| Ag <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>   | 849          | —               | —                          | —                                        | —               | BaSO <sub>4</sub>                            | 1350     | 40,6            | —                          | —                                        | [4]             |
| Ag <sub>2</sub> S                 | 838          | 14,1            | разл.                      | —                                        | —               | BaSe                                         | 1780     | 38              | —                          | —                                        | —               |
| Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>   | 657          | 17,9            | >1085 (разл.)              | —                                        | [4]             | BaWO <sub>4</sub>                            | 1475     | —               | 1730                       | —                                        | —               |
| Ag <sub>2</sub> Se                | 897          | 17,58           | разл.                      | —                                        | [6]             | BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>             | 1870     | 171,5           | —                          | —                                        | —               |
| Ag <sub>2</sub> Te                | 960          | 21,4            | —                          | —                                        | [6]             | BeBr <sub>2</sub>                            | 508      | 18              | 540                        | 98                                       | —               |
| AlB <sub>12</sub>                 | 2159         | —               | —                          | —                                        | —               | Be <sub>2</sub> C                            | 2400     | 75,4            | 2537                       | —                                        | [7]             |
| Al(BH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | —64,5        | —               | 44,5                       | 30,0                                     | [4, 5]          | BeCl <sub>2</sub>                            | 415      | 15,3            | 550                        | 110                                      | —               |
| AlBr <sub>3</sub>                 | 97,5         | 11,3            | 256,2                      | 23,5                                     | [4]             | BeF <sub>2</sub>                             | 800      | 21              | 1175                       | 200                                      | —               |
| Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>    | 2100         | —               | —                          | —                                        | [2]             | BeI <sub>2</sub>                             | 490      | 18              | 530                        | 98                                       | —               |
| AlCl <sub>3</sub>                 | —            | субли.          | 180,2                      | 56,1                                     | [2]             | Be <sub>3</sub> N <sub>2</sub>               | 2200     | 109             | —                          | —                                        | —               |
| AlCl <sub>4</sub>                 | —            | субли.          | 180,1                      | 112                                      | [5]             | BeO                                          | 2550     | 85,4            | 4120                       | 489,9                                    | [3, 4]          |
| AlF                               | 827          | 21,8            | 1402                       | 155                                      | [2]             | BeSO <sub>4</sub>                            | 1100     | 6 (разл.)       | —                          | —                                        | —               |
| AlF <sub>3</sub>                  | —            | субли.          | 1272                       | 318                                      | [2]             | BiBr <sub>3</sub>                            | 219      | 21,7            | 461                        | 75                                       | —               |
| AlH <sub>3</sub>                  | >105 (разл.) | —               | —                          | —                                        | —               | BiCl <sub>2</sub>                            | 163      | 14,7            | 577                        | 83,7                                     | [2]             |
| AlI <sub>3</sub>                  | 191          | 15,9            | 382                        | 67                                       | —               | BiCl <sub>3</sub>                            | 233      | 23,6            | 439                        | 74                                       | —               |
| AlN                               | 2227         | —               | —                          | —                                        | [4]             | BiF <sub>3</sub>                             | 727      | 25,96           | 1127                       | 117,2                                    | [2]             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 2046,5       | 113,0           | 2980                       | 485,7                                    | [3]             | BiF <sub>5</sub>                             | 151,4    | —               | 230                        | 62,3                                     | [4]             |
| AlPO <sub>4</sub>                 | 2000         | —               | —                          | —                                        | —               | BiI <sub>3</sub>                             | 407,7    | 32              | 542 (разл.)                | 78                                       | —               |
| Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>    | 1100         | —               | 1500 (разл.)               | —                                        | —               | BiO                                          | 902      | 15,5            | 1647                       | 226                                      | [3]             |
| AmF <sub>3</sub>                  | 1427         | 54,3            | 2067                       | 276                                      | [2]             | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | —        | —               | —                          | —                                        | —               |
| Am <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 2205         | 71,2            | 3127                       | 356                                      | [2, 3]          | куб.                                         | 825      | 16,3            | 1890                       | —                                        | [3]             |
| AsBr <sub>3</sub>                 | 31,2         | 11,8            | 221                        | 41,8                                     | [4]             | моноклин.                                    | 817      | 62,8            | 1890                       | —                                        | [3]             |
| AsCl <sub>3</sub>                 | —16          | 10,1            | 130                        | 38,1                                     | —               | Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>               | 685      | 79,4            | —                          | —                                        | —               |
| AsF <sub>3</sub>                  | —8,5         | 10,4            | 57,8                       | 33,5                                     | —               | Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>              | 586      | 118,6           | —                          | —                                        | [7]             |
| AsF <sub>5</sub>                  | —79,8        | 11,5            | —52,8                      | —                                        | [4]             | BrF                                          | —33      | —               | 20 (разл.)                 | 25,1                                     | [4]             |
| AsH <sub>3</sub>                  | —116,9       | 1,2             | —62,5                      | 16,7                                     | [4]             | BrF <sub>3</sub>                             | 8,8      | 12,03           | 126                        | 42,7                                     | —               |
| AsI <sub>3</sub>                  | 141          | 21,8            | 371                        | 56,5                                     | —               | BrF <sub>5</sub>                             | —61,3    | 7,4             | 40,8                       | 30,6                                     | —               |
| As <sub>4</sub> O <sub>6</sub>    | —            | —               | —                          | —                                        | —               | CBBr <sub>4</sub>                            | 93,6     | 4,0             | 190                        | 38                                       | —               |
| куб.                              | 278          | 48,6            | 457                        | 56,1                                     | [3]             | CCl <sub>4</sub>                             | —22,88   | 2,5             | 76,73                      | 30,0                                     | —               |
| моноклин.                         | 314          | 45,2            | 465                        | 96,3                                     | [3]             | CF <sub>4</sub>                              | —183,7   | 0,695           | —128,0                     | 12,3                                     | —               |
| октаэдр.                          | 314          | 49,8            | 465                        | 109,3                                    | [3]             | Cl <sub>4</sub>                              | 171      | —               | разл.                      | —                                        | —               |
| As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>    | 307          | —               | 723                        | 86                                       | [2]             | C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>                | —34,4    | 8,1             | —21,2                      | 23,3                                     | —               |
| AuCl <sub>3</sub>                 | 288          | 12,98           | —                          | —                                        | [2]             | CNI                                          | —        | субли.          | 139,8                      | 59,4                                     | [5]             |
| AuF                               | 577          | 12,1            | 1200                       | 142,0                                    | [2]             | CO                                           | —205,02  | 0,8386          | —191,50                    | 6,044                                    | [3]             |
| AuZn                              | 760          | 24,6            | —                          | —                                        | [5]             | CO <sub>2</sub>                              | —        | субли.          | —78,515                    | 25,23                                    | [3]             |
| BBr <sub>3</sub>                  | —46          | —               | 89,8                       | 29,7                                     | —               | C <sub>3</sub> O <sub>2</sub>                | —111,3   | —               | 7,0                        | 25                                       | [4]             |
| B <sub>4</sub> C                  | 2450         | 104,7           | >3500                      | —                                        | [7]             | COS                                          | —138,2   | 4,73            | —50,2                      | 18,51                                    | —               |
| BCl <sub>3</sub>                  | —107,2       | 6,8             | 12,5                       | 23,9                                     | [4]             | COSe                                         | —124,4   | —               | —21,7                      | 22,6                                     | [4]             |
| B <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>    | —92,9        | 10,8            | 65,5                       | 33,6                                     | [4]             | CP                                           | —110     | 10,9            | —                          | —                                        | [4]             |
| BF <sub>3</sub>                   | —128         | 4,6             | —100                       | 17,1                                     | —               | CS <sub>2</sub>                              | —111,9   | 4,39            | 46,24                      | 26,78                                    | —               |
| B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>     | —165,6       | 4,5             | —92,5                      | 14,3                                     | [4]             | CSSe                                         | —85      | —               | 84,5                       | 31,62                                    | [4]             |
| B <sub>4</sub> H <sub>10</sub>    | —121         | —               | 18                         | 25,5                                     | —               | CSe <sub>2</sub>                             | —45,5    | —               | 125                        | 33                                       | —               |
| B <sub>5</sub> H <sub>9</sub>     | 48,8         | —               | 60,0                       | 28,9                                     | —               | CaB <sub>6</sub>                             | 2235     | —               | —                          | —                                        | [7]             |
| B <sub>10</sub> H <sub>14</sub>   | 99,5         | 32,7            | 213                        | 44                                       | [2]             | CaBr <sub>2</sub>                            | 742      | 29,1            | 1830                       | 212                                      | —               |
| BI <sub>3</sub>                   | 49,9         | —               | 209,5                      | 41,8                                     | —               | CaC <sub>2</sub>                             | 2300     | 32,2            | —                          | —                                        | [7]             |
| BN (α—)                           | 3000         | —               | 5067                       | —                                        | [7]             |                                              |          |                 |                            |                                          |                 |

| Вещество                                                | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}^*$<br>$t_{субл.}$ | $\Delta H_{кип}^*$<br>$\Delta H_{субл.}$ | Лите-<br>ратура | Вещество                             | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}^*$<br>$t_{субл.}$ | $\Delta H_{кип}^*$<br>$\Delta H_{субл.}$ | Лите-<br>ратура |
|---------------------------------------------------------|--------------|-----------------|----------------------------|------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------|-----------------|----------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| CaCO <sub>3</sub> арагонит<br>(кальцит,<br>гекс. разл.) | 50           | 0,19            | —                          | —                                        | [2]             | CrCl <sub>2</sub>                    | 824          | 37              | 1330                       | 198                                      | —               |
| CaCl <sub>2</sub>                                       | 772          | 28,0            | 1960                       | 225                                      | —               | CrCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>     | —96,5        | —               | 116,7                      | 35,9                                     | [4]             |
| CaF <sub>2</sub>                                        | 1418         | 29,7            | 2530                       | 305                                      | —               | CrF <sub>2</sub>                     | 894          | 19              | 1820                       | 251,2                                    | [2]             |
| CaH <sub>2</sub>                                        | 814          | 21              | 1000 (разл.)               | —                                        | —               | CrF <sub>3</sub>                     | 1100         | 41,8            | 1425                       | 201                                      | [2]             |
| CaI <sub>2</sub>                                        | 783          | 41,8            | 1760                       | 179                                      | —               | CrF <sub>2</sub> O                   | 31,6         | 23,4            | —                          | —                                        | [4]             |
| CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                     | 750 (разл.)  | —               | —                          | —                                        | —               | CrO <sub>3</sub>                     | 187          | 25,5            | 727 (разл.)                | —                                        | [3]             |
| CaMg(SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                    | 1392         | 128             | —                          | —                                        | —               | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 2234         | 104,7           | 3000                       | —                                        | [3]             |
| CaMoO <sub>4</sub>                                      | 1450         | —               | —                          | —                                        | —               | CrS                                  | 1565         | —               | —                          | —                                        | [7]             |
| Ca <sub>3</sub> N <sub>2</sub>                          | 1195         | —               | —                          | —                                        | —               | CsBr                                 | 638          | 23,6            | 1290                       | 148                                      | —               |
| Ca(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                        | 140 (взр.)   | —               | —                          | —                                        | —               | CsCl                                 | 645          | 20,3            | 1300                       | 138                                      | —               |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                       | 561          | 21,3            | разл.                      | —                                        | [4]             | Cs <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>     | 975          | 36,0            | —                          | —                                        | —               |
| CaO                                                     | 2630         | 52              | 3500                       | 625,3                                    | [3]             | CsF                                  | 703          | 21,7            | 1250                       | 123                                      | —               |
| CaO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O                     | 200          | —               | 250 (взр.)                 | —                                        | —               | CsH                                  | 682          | 10,26           | 1252                       | —                                        | [2]             |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                                     | 580          | —               | —                          | —                                        | —               | CsI                                  | 632          | 26              | 1280                       | 133                                      | —               |
| Ca(PO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                       | 984          | 82,9            | —                          | —                                        | —               | CsI <sub>3</sub>                     | 215          | 25,1            | разл.                      | —                                        | —               |
| Ca <sub>3</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>           | 1358         | 100,8           | —                          | —                                        | —               | CsNO <sub>3</sub>                    | 409          | 13,8            | —                          | —                                        | —               |
| CaS                                                     | 2525         | 67              | —                          | —                                        | [7]             | CsO <sub>2</sub>                     | 560          | 20              | >597 (разл.)               | —                                        | [3]             |
| CaSO <sub>4</sub>                                       | 1460         | 28              | —                          | —                                        | —               | Cs <sub>2</sub> O                    | 490          | 19,2            | 495 (разл.)                | —                                        | [3]             |
| CaSiO <sub>3</sub>                                      | 1544         | —               | —                          | —                                        | —               | Cs <sub>2</sub> O <sub>2</sub>       | 594          | 22              | 650 (разл.)                | —                                        | [3]             |
| CaTiO <sub>3</sub>                                      | 1960         | —               | —                          | —                                        | —               | CsOH                                 | 343          | 4,6             | —                          | —                                        | —               |
| CaWO <sub>4</sub>                                       | 1580         | —               | —                          | —                                        | —               | CsSO <sub>4</sub>                    | 1015         | 36              | —                          | —                                        | —               |
| CrZrO <sub>3</sub>                                      | 2350         | —               | —                          | —                                        | —               | CuBr                                 | 489          | 7,2             | 1355                       | 68,2                                     | —               |
| Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub>                         | 721          | 74,1            | —                          | —                                        | [6]             | CuBr <sub>2</sub>                    | 498          | —               | —                          | —                                        | —               |
| CdBr                                                    | 565          | 20,9            | 863                        | —                                        | [2]             | CuCl                                 | 430          | 10,2            | 1212                       | 151                                      | [2]             |
| CdBr <sub>2</sub>                                       | 568          | 33              | 865                        | 102,5                                    | —               | CuCl <sub>2</sub>                    | 596          | —               | —                          | —                                        | —               |
| CdCl <sub>2</sub>                                       | 568          | 31,8            | 964                        | 121                                      | —               | CuF <sub>2</sub>                     | 770          | 73,3            | 1387                       | 150,7                                    | [2]             |
| CdF <sub>2</sub>                                        | 1072         | 22,6            | 1747                       | 225,2                                    | [2]             | CuI                                  | 602          | 10,88           | 1320                       | 130,2                                    | [2, 6]          |
| CdI <sub>2</sub>                                        | 388          | 20,7            | 796                        | 122,7                                    | [2]             | CuO                                  | 1336         | 37,3 (разл.)    | —                          | —                                        | [3]             |
| Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O    | 59,4         | 32,6            | 132                        | —                                        | —               | Cu <sub>2</sub> O                    | 1242         | 64,23           | 1800 (разл.)               | —                                        | [3]             |
| CdO                                                     | —            | субл.           | 1559                       | 225                                      | [5]             | CuS                                  | 1100         | 316,1 (разл.)   | —                          | —                                        | [2]             |
| CdS                                                     | —            | субл.           | 1380                       | 213,5                                    | [2]             | Cu <sub>2</sub> S                    | 1129         | 11,3            | —                          | —                                        | —               |
| CdSO <sub>4</sub>                                       | 1135         | —               | —                          | —                                        | —               | CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O | 250          | —               | —                          | —                                        | —               |
| CdSe                                                    | 1252         | 45,2            | —                          | —                                        | [6]             | Cu <sub>2</sub> Se                   | 1113         | 18,0            | —                          | —                                        | [6]             |
| CdTe                                                    | 1092         | 57,4            | —                          | —                                        | [6]             | DBr                                  | —87,63       | 2,402           | —66,85                     | 17,82                                    | [4]             |
| CeB <sub>6</sub>                                        | 2190         | —               | —                          | —                                        | —               | DCI                                  | —114,7       | 1,908           | —84,75                     | —                                        | [4]             |
| CeBr <sub>3</sub>                                       | 732          | —               | 1705                       | 188,5                                    | [4]             | DF                                   | —83,6        | —               | 18,36                      | —                                        | [4]             |
| CeC <sub>2</sub>                                        | 2250         | —               | —                          | —                                        | —               | DI                                   | —51,82       | 2,863           | —36,2                      | 19,72                                    | [4]             |
| CeCl <sub>3</sub>                                       | 822          | 54              | 1650                       | 199                                      | —               | D <sub>2</sub> O                     | 3,813        | 6,314           | 101,43                     | 45,43                                    | [3]             |
| CeF <sub>3</sub>                                        | 1432         | 58,5            | 2180                       | 274,1                                    | —               | D <sub>2</sub> O <sub>2</sub>        | 1,5          | —               | 25,0                       | 52,38                                    | [3]             |
| CeO <sub>2</sub>                                        | 2600         | 80              | —                          | 565,2                                    | [3]             | DyBr <sub>3</sub>                    | 881          | 38              | 1085                       | 199                                      | [2]             |
| Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                          | 1920         | 83,7            | 3227                       | 339,9                                    | [3]             | DyCl <sub>3</sub>                    | 653          | —               | 1539                       | 187                                      | —               |
| ClF                                                     | —155,6       | —               | —100,1                     | 22                                       | —               | DyF <sub>3</sub>                     | 1160         | 58,6            | >2200                      | —                                        | —               |
| ClF <sub>3</sub>                                        | —76,31       | 7,612           | 11,76                      | 27,53                                    | —               | Dyl <sub>3</sub>                     | 983          | 41,9            | 1320                       | 172                                      | —               |
| ClFO <sub>2</sub>                                       | —115         | —               | —6                         | 29,5                                     | [4]             | Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 2385         | —               | —                          | —                                        | [3]             |
| ClFO <sub>3</sub>                                       | —147,7       | 3,83            | —46,67                     | 19,33                                    | [4]             | ErBr <sub>3</sub>                    | 950          | 41,9            | 1460                       | 179,6                                    | [2]             |
| ClO <sub>2</sub>                                        | —59,8 (взр.) | 9,7 (взр.)      | 26,33                      | —                                        | [3]             | ErF <sub>3</sub>                     | 1146         | 27,5            | 2200                       | —                                        | —               |
| Cl <sub>2</sub> O                                       | —116 (взр.)  | 2,2 (взр.)      | 25,96                      | —                                        | [3]             | ErI <sub>3</sub>                     | 1015         | 41,9            | 1280                       | 167                                      | [2]             |
| Cl <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                          | —90 (взр.)   | 78,8 (взр.)     | 32,4                       | —                                        | [3]             | EuBr <sub>2</sub>                    | 683          | 25,12           | 1880                       | 218                                      | [2]             |
| CoBr <sub>2</sub>                                       | 678          | —               | 927                        | —                                        | —               | EuCl <sub>2</sub>                    | 854          | 23              | 2060                       | 246                                      | —               |
| CoCl <sub>2</sub>                                       | 740          | 38              | 1053                       | 145                                      | [4]             | EuF <sub>2</sub>                     | 1416         | —               | >2400                      | —                                        | —               |
| CoF <sub>2</sub>                                        | 1202         | 30,1            | 1400                       | 200,9                                    | [2]             | EuF <sub>3</sub>                     | 1276         | —               | 2280                       | —                                        | —               |
| CoI <sub>2</sub>                                        | 515          | —               | 570 (разл.)                | —                                        | —               | EuI <sub>2</sub>                     | 580          | 21              | 1775                       | 167                                      | [2]             |
| CoO                                                     | 1810         | 50,24           | 2627                       | 255,4                                    | [3]             | F <sub>2</sub> O                     | —223,85      | 85              | —145,05                    | 11,10                                    | [3]             |
| Co <sub>2</sub> P                                       | 1386         | —               | —                          | —                                        | [7]             | F <sub>2</sub> O <sub>2</sub>        | —163,4       | —               | —                          | —                                        | [3]             |
| CoS                                                     | 1100         | —               | —                          | —                                        | —               | FeB                                  | 1650         | —               | —                          | —                                        | [7]             |
| CoSO <sub>4</sub>                                       | 1089         | —               | —                          | —                                        | [2]             | FeBr <sub>2</sub>                    | 688          | 54              | 968                        | 125                                      | —               |
| CoSi                                                    | 1400         | 67              | —                          | —                                        | [2]             | FeBr <sub>3</sub>                    | 297          | —               | 627                        | —                                        | —               |
| CoSi <sub>2</sub>                                       | 1327         | 100,2           | —                          | —                                        | [7]             | FeCO <sub>3</sub>                    | >490 (разл.) | —               | —                          | —                                        | —               |
| Co <sub>2</sub> Si                                      | 1332         | 64,05           | —                          | —                                        | —               | Fe(CO) <sub>5</sub>                  | —21          | 13,2            | 105                        | 40,2                                     | —               |
| Co <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                        | 1415         | —               | —                          | —                                        | [7]             | Fe <sub>2</sub> CaO <sub>4</sub>     | 1220         | —               | 108                        | —                                        | —               |
| CrB                                                     | 2070         | —               | —                          | —                                        | —               | FeCl <sub>2</sub>                    | 677          | 43,0            | 1012                       | 125                                      | —               |
| Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>                          | 1895         | —               | 3800                       | —                                        | [7]             | FeCl <sub>3</sub>                    | 307,5        | 38              | 315                        | 30                                       | —               |
|                                                         |              |                 |                            |                                          |                 | FeF <sub>2</sub>                     | 1102         | 33,5            | 1827                       | 208,3                                    | [2, 4]          |
|                                                         |              |                 |                            |                                          |                 | FeF <sub>3</sub>                     | 1027         | 50,2            | 1327                       | 167,5                                    | [2]             |

| Вещество             | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}^{*}$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}^{*}$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура | Вещество             | $t_{пл}$      | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}^{*}$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}^{*}$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура |
|----------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------------|-----------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------------|-----------------|
| $FeH_2(CO)_4$        | -70,2        | —               | -30                         | 25,5                                      | [4, 5]          | $H_2S_2$             | -89,5         | 7,5             | 70,7                        | 35,1                                      | [4, 5]          |
| $FeI_2$              | 594          | 75              | 935                         | 111,9                                     | [4]             | $H_2SO_4$            | 10,31         | 10,7            | 279,6 (разл.)               | —                                         | —               |
| $Fe_{0,95}O$         | 1374         | 31,4            | 2512                        | 230,3                                     | [3]             | $H_2SO_4 \cdot H_2O$ | 8,48          | 19,5            | 290                         | —                                         | —               |
| $Fe_2O_3$ магнетит   | 1562 (разл.) | —               | —                           | —                                         | [3]             | $H_2Se$              | -65,7         | 2,515           | -41,4                       | 19,9                                      | —               |
| $Fe_2O_3$ гематит    | 1350         | —               | —                           | —                                         | [3]             | $H_2SeO_4$           | 62,4          | 14,4            | >65 (разл.)                 | —                                         | —               |
| $Fe_3O_4$            | 1583         | 138,16          | 2623 (разл.)                | —                                         | [3]             | $HTO$                | —             | —               | 100,8                       | 46,89 (25 °C)                             | [3]             |
| $FeS$                | 1193         | 32,4            | —                           | —                                         | [7]             | $H_2Te$              | -51           | 4,2             | -2                          | 23                                        | —               |
| $FeS_2$              | 1700         | —               | —                           | —                                         | —               | $H_2WO_4$            | >100          | —               | —                           | —                                         | —               |
| $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ | 64           | —               | 300                         | —                                         | —               | $Hf(BH_4)_4$         | 29,0          | 14,2            | 118                         | 40,2                                      | [4]             |
| $FeSi$               | 1405         | 69              | —                           | —                                         | —               | $HfBr_4$             | —             | субл.           | 322                         | 100,4                                     | [4]             |
| $Fe_2SiO_4$          | 1217         | 92              | —                           | —                                         | —               | $HfC$                | 3890          | —               | 5400                        | —                                         | [7]             |
| $GaAs$               | 1238         | 97,1            | —                           | —                                         | [6]             | $HfCl_2$             | 727           | 24,7            | 1475                        | 147                                       | [2]             |
| $GaBr_3$             | 121          | 11,72           | 279                         | 43,55                                     | [2]             | $HfCl_4$             | —             | субл.           | 315                         | 103                                       | —               |
| $GaCl_2$             | 164          | 16,8            | 535                         | 79,6                                      | [2]             | $HfF_2$              | 1377          | 20,9            | 2030                        | 203                                       | [2]             |
| $GaCl_3$             | 78           | 11,5            | 201                         | 62,8                                      | [2]             | $HfF_4$              | —             | субл.           | 974                         | 226                                       | —               |
| $GaF_3$              | —            | субл.           | 952                         | 188,4                                     | [2]             | $HfN$                | 3000          | —               | —                           | —                                         | [7]             |
| $GaI_3$              | -21,4        | —               | 139 (разл.)                 | —                                         | —               | $HfO_2$              | 2780          | 71              | —                           | —                                         | [3]             |
| $GaI_3$              | 212          | 22              | 345                         | 69                                        | —               | $HgBr_2$             | 238           | 17,9            | 319                         | 59                                        | —               |
| $Ga_2O$              | 652          | 35,6            | 727                         | 83,74                                     | [3]             | $Hg_2Br_2$           | —             | субл.           | 392,5                       | —                                         | —               |
| $Ga_2O_3$            | 1725         | 92              | 2627                        | 314                                       | [3]             | $HgBrI$              | 229           | —               | 360                         | —                                         | —               |
| $Ga_2S_3$            | 1110         | —               | —                           | —                                         | —               | $HgCl_2$             | 280           | 19,2            | 302                         | 57,8                                      | —               |
| $GaSe$               | 960          | 38,9            | —                           | —                                         | [6]             | $Hg_2Cl_2$           | —             | субл.           | 383,7                       | —                                         | —               |
| $GaTe$               | 835          | 52,8            | —                           | —                                         | [6]             | $HgF_2$              | 645           | 23,03           | 647                         | 92,1                                      | [2]             |
| $GdBr$               | 785          | 33,5            | 1490                        | —                                         | [2]             | $Hg_2F_2$            | 570           | —               | разл.                       | —                                         | —               |
| $GdCl_3$             | 605          | 40,5            | 1600                        | 203,8                                     | —               | $HgI_2$              | 256           | 18,8            | 353                         | 60                                        | —               |
| $GdI_3$              | 926          | 41,9            | 1340                        | 167                                       | [2]             | $HgO$ (крас-<br>ный) | 500 (разл.)   | —               | —                           | —                                         | [3]             |
| $Gd_2O_3$            | 2322         | —               | —                           | —                                         | [3]             | $HgS$                | 825           | —               | —                           | —                                         | —               |
| $GeBr_4$             | 26,1         | 12,14           | 186,8                       | 41                                        | [2]             | $HgSO_4$             | >550 (разл.)  | —               | —                           | —                                         | —               |
| $GeCl_4$             | -49,5        | —               | 83,1                        | 33                                        | —               | $HoBr_3$             | 919           | 50,2            | 1336                        | —                                         | —               |
| $GeF_2$              | 112          | 21,8            | 1552                        | 180                                       | [2]             | $HoCl_3$             | 720           | 30,4            | 1517                        | 190                                       | —               |
| $GeF_4$              | —            | субл.           | -36,6                       | 31                                        | —               | $HoF_3$              | 1140          | 56,3            | 2200                        | —                                         | —               |
| $GeH_4$              | -165,8       | 0,84            | -88,5                       | 14,06                                     | —               | $Hol_3$              | 989           | 41,9            | 1300                        | 172                                       | [2]             |
| $Ge_2H_6$            | -109         | —               | 31                          | 24,7                                      | —               | $IBr$                | 42            | —               | 119 (разл.)                 | —                                         | —               |
| $Ge_3H_8$            | -105,6       | —               | 110,5                       | 29                                        | —               | $ICl$                | 27,2          | 11,1            | 98 (разл.)                  | —                                         | —               |
| $GeHCl_3$            | -71          | —               | 75,3                        | 33,5                                      | [4]             | $IF_5$               | 9,4           | 15,9            | 100                         | 41,3                                      | [4]             |
| $GeI_4$              | 144          | —               | 440 (разл.)                 | —                                         | —               | $IF_7$               | —             | субл.           | 3,4                         | 30,7                                      | [5]             |
| $GeO$                | —            | субл.           | 710                         | 209,3                                     | [3]             | $I_2O_4$             | 130           | —               | —                           | —                                         | [3]             |
| $GeO_2$ , тетр.      | 1086         | 43,96           | >2352                       | 255,4                                     | [3]             | $InBr$               | 220           | 24              | 680                         | 92                                        | [4]             |
| $GeO_2$ , гекс.      | 1116         | 17,2            | 2352                        | 255                                       | [3]             | $InBr_2$             | 235           | —               | 633                         | 82,4                                      | [4]             |
| $GeS$                | 665          | 21              | 827                         | —                                         | [4]             | $InBr_3$             | —             | субл.           | 409                         | 123                                       | —               |
| $GeSe$               | 670          | 32,6            | разл.                       | —                                         | [6]             | $InCl$               | 225           | 9               | 590                         | 97                                        | —               |
| $HBO_2$              | 236          | —               | —                           | —                                         | —               | $InCl_2$             | 235           | 14,65           | 523                         | 92,1                                      | [2]             |
| $HBr$                | -86,9        | 2,406           | -66,8                       | 17,61                                     | [4]             | $InCl_3$             | —             | субл.           | 500                         | 170                                       | —               |
| $HCN$                | -13,3        | 8,41            | 25,65                       | 25,2                                      | —               | $InF$                | 452           | 13,4            | 900                         | 109                                       | [2]             |
| $HCl$                | -114,2       | 2,0             | -85,08                      | 16,2                                      | —               | $InF_3$              | 1170          | 46,1            | 1377                        | 163,3                                     | [2]             |
| $HClO_4$             | -101         | 6,93            | 25                          | 39,7                                      | —               | $InI$                | 351           | 22              | 713                         | 85                                        | —               |
|                      |              |                 | (3 кПа)                     | (3 кПа)                                   | [3]             | $InI_3$              | 210           | 20              | 447                         | 95                                        | —               |
| $HDO$                | —            | —               | 100,85                      | 44,67 (25 °C)                             | —               | $InO$                | 1052          | 16,75           | 1727                        | 251,2                                     | [3]             |
| $HF$                 | -88,36       | 3,929           | 19,52                       | 7,49                                      | —               | $In_2O$              | 327           | 18,84           | 527                         | 67                                        | [3]             |
| $HI$                 | -50,8        | 2,871           | -35,4                       | 19,77                                     | —               | $In_2O_3$            | 1910          | 83,74           | 3327                        | 356                                       | [3]             |
| $HIO_3$              | 110          | —               | —                           | —                                         | —               | $InS$                | 692           | —               | 850                         | —                                         | —               |
| $H_2MoO_4$           | 70           | —               | —                           | —                                         | —               | $In_2S_3$            | —             | субл.           | 850                         | —                                         | [6]             |
| $HN_3$               | -80          | —               | 36                          | 29,7                                      | —               | $In_2Se_3$           | 890           | 64              | —                           | —                                         | [6]             |
| $HNO_3$              | -41,6        | 10,5            | 83                          | 30,14                                     | [2]             | $In_2Te_3$           | 670           | 81,6            | —                           | —                                         | —               |
| $H_2O$               | 0,00         | 6,013           | 100,00                      | 40,683                                    | [3]             | $IrCl_3$             | 442           | 28,1            | 687                         | 100                                       | [2]             |
| $H_2O_2$             | -0,42        | 12,51           | 152,0                       | 51,6 (25 °C)                              | [3]             | $IrF_2$              | 1107          | 9,63            | 1730                        | 184                                       | [2]             |
|                      |              |                 |                             |                                           | —               | $IrF_6$              | 44,1          | 5,0             | 53,6                        | 30,5                                      | —               |
| $H_3PO_2$            | 26,5         | 13,0            | >50 (разл.)                 | —                                         | —               | $IrO_2$              | >1100 (разл.) | —               | —                           | —                                         | [3]             |
| $H_3PO_3$            | 70,1         | 12,85           | —                           | —                                         | [4]             | $Ir_2O_3$            | 1177          | 41,87           | 1977                        | 209,3                                     | [3]             |
| $H_3PO_4$            | 42,35        | 13,0            | 213 (разл.)                 | —                                         | —               | $KBF_4$              | 570           | 18,0            | —                           | —                                         | —               |
| $H_4P_2O_7$          | 61           | 9,2             | —                           | —                                         | —               | $KBr$                | 734           | 25,5            | 1407                        | 149                                       | —               |
| $H_2S$               | -85,6        | 2,38            | -60,35                      | 18,7                                      | —               |                      |               |                 |                             |                                           |                 |

| Вещество                                                           | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}'$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}'$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура | Вещество                                        | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}'$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}'$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------|
| KBr <sub>2</sub> I                                                 | 58           | —               | 180 (разл.)              | —                                      | [5]             | Li <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                | 1201         | 28              | —                        | —                                      | —               |
| KCN                                                                | 623          | 14,6            | —                        | —                                      | [4]             | Li <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>                 | 740          | 28,5            | —                        | —                                      | —               |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                     | 900          | 27,9            | разл.                    | —                                      | —               | LuCl <sub>3</sub>                               | 925          | —               | 1420                     | 121                                    | —               |
| KCl                                                                | 776          | 26,3            | 1430                     | 152                                    | —               | LuF <sub>3</sub>                                | 1184         | 30,2            | 2200                     | —                                      | —               |
| KClO <sub>3</sub>                                                  | 357          | 21              | —                        | —                                      | —               | LuI <sub>3</sub>                                | 1045         | 46,0            | 1200                     | 201                                    | [2, 4]          |
| K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>                                    | 973          | 33,0            | —                        | —                                      | —               | Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 2467         | —               | —                        | —                                      | [3]             |
| KF                                                                 | 857          | 29,4            | 1505                     | 172                                    | —               | MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                | 2115         | —               | —                        | —                                      | —               |
| KHF <sub>2</sub>                                                   | 238,7        | 6,62            | >400 (разл.)             | —                                      | —               | Mg <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 1410         | —               | —                        | —                                      | —               |
| KHSO <sub>4</sub>                                                  | 222          | 18              | разл.                    | —                                      | —               | MgBr <sub>2</sub>                               | 711          | 39              | 1230                     | 151                                    | [4]             |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                                    | 252,6        | —               | —                        | —                                      | —               | MgCO <sub>3</sub>                               | 500 (разл.)  | —               | —                        | —                                      | —               |
| KI                                                                 | 681          | 24,0            | 1340                     | 138                                    | —               | MgCl <sub>2</sub>                               | 714          | 43,1            | 1370                     | 166                                    | —               |
| KMnO <sub>4</sub>                                                  | >200 (разл.) | —               | —                        | —                                      | —               | MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                | 2350         | —               | —                        | —                                      | —               |
| KMoO <sub>4</sub>                                                  | 926          | 39              | 1400 (разл.)             | —                                      | —               | MgF <sub>2</sub>                                | 1263         | 58              | 2270                     | 274                                    | —               |
| KNO <sub>2</sub>                                                   | 438          | 17              | разл.                    | —                                      | —               | MgI <sub>2</sub>                                | 633          | 26              | 1014                     | 151                                    | —               |
| KNO <sub>3</sub>                                                   | 334,5        | 9,80            | >400 (разл.)             | —                                      | —               | MgO                                             | 2825         | 77,5            | 3600                     | 544,3                                  | [3]             |
| KNaC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> ·4H <sub>2</sub> O | 75           | —               | 215                      | —                                      | —               | Mg(OH) <sub>2</sub>                             | 350          | —               | —                        | —                                      | —               |
| KO <sub>2</sub>                                                    | 380          | 20,52           | 543 (разл.)              | —                                      | [3]             | Mg <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>   | 1395         | 134             | —                        | —                                      | —               |
| K <sub>2</sub> O                                                   | 707          | 28,5            | разл.                    | —                                      | [3]             | MgSO <sub>4</sub>                               | 1137         | 15              | —                        | —                                      | —               |
| K <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                                      | 490          | 29,31           | 1527                     | 188,4                                  | [3]             | Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>                 | 1250         | —               | —                        | —                                      | —               |
| K <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 430          | 25,54           | 700                      | 104,7                                  | [3]             | Mg <sub>2</sub> Si                              | 1085         | 85,83           | —                        | —                                      | [7]             |
| KOH                                                                | 405          | 9,4             | 1320                     | 129                                    | [4]             | Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                | 1890         | 66,1            | —                        | —                                      | —               |
| KPO <sub>3</sub>                                                   | 813          | 18,4            | 1320                     | —                                      | —               | MgWO <sub>4</sub>                               | 1360         | —               | —                        | —                                      | —               |
| K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                     | 1640         | —               | —                        | —                                      | —               | MnAs                                            | 936          | —               | —                        | —                                      | —               |
| KReO <sub>4</sub>                                                  | 553          | 32              | 1367                     | —                                      | —               | MnB <sub>2</sub>                                | 1988         | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| K <sub>2</sub> S                                                   | 948          | 16,2            | —                        | —                                      | —               | MnBr <sub>2</sub>                               | 698          | —               | —                        | —                                      | —               |
| KSCN                                                               | 177,0        | 10              | 500 (разл.)              | —                                      | —               | MnCl <sub>2</sub>                               | 650          | 37,7            | 1238                     | 148                                    | —               |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                     | 1069         | 36,8            | 1700                     | —                                      | —               | MnF <sub>2</sub>                                | 860          | 14              | 1640                     | 256                                    | —               |
| K <sub>2</sub> SeO <sub>4</sub>                                    | 1020         | —               | —                        | —                                      | —               | MnF <sub>4</sub>                                | 387          | 23,8            | 412                      | 67                                     | [2]             |
| K <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>                                    | 1045         | 35,2            | —                        | —                                      | —               | MnI <sub>2</sub>                                | 638          | —               | —                        | —                                      | —               |
| KVO <sub>3</sub>                                                   | 522          | —               | —                        | —                                      | —               | MnO                                             | 1842         | 43,96           | 3127 (разл.)             | —                                      | [3]             |
| K <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>                                     | 923          | 31,0            | —                        | —                                      | —               | MnO <sub>2</sub>                                | 847 (разл.)  | —               | —                        | —                                      | [3]             |
| KrF <sub>2</sub>                                                   | 20 (разл.)   | —               | —                        | —                                      | —               | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 1347 (разл.) | —               | —                        | —                                      | [3]             |
| LaB <sub>6</sub>                                                   | 2715         | —               | —                        | —                                      | —               | Mn <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                  | 5,9          | —               | >55 (разл.)              | —                                      | —               |
| LaBr <sub>3</sub>                                                  | 783          | 33,5            | 1580                     | 202                                    | [2, 4]          | $\alpha$ -Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>        | 1590         | 138             | 2630                     | 314                                    | [2]             |
| LaC <sub>2</sub>                                                   | 2365         | —               | —                        | —                                      | [7]             | $\beta$ -Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>         | 1560         | 127,7           | 2627                     | 314                                    | [3]             |
| LaCl <sub>3</sub>                                                  | 862          | 54,4            | 1710                     | 209                                    | —               | MnO <sub>3</sub> F                              | —38          | —               | 60                       | 34                                     | [4]             |
| LaF <sub>3</sub>                                                   | 1493         | 41,8            | 2330                     | 234                                    | [2]             | MnP                                             | 1147         | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| LaI <sub>3</sub>                                                   | 779          | 33,5            | 1580                     | 167                                    | [2]             | MnS                                             | 1530         | 26,1            | —                        | —                                      | [7]             |
| La <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                   | 1015         | —               | —                        | —                                      | —               | MnSO <sub>4</sub>                               | 700          | —               | 850 (разл.)              | —                                      | —               |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     | 2217         | 75,4            | 4200                     | —                                      | [3]             | MnSi                                            | 1275         | 59,4            | —                        | —                                      | [7]             |
| La <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                     | 2080         | —               | —                        | —                                      | —               | MnSiO <sub>3</sub>                              | 1323         | 34,3            | —                        | —                                      | [4]             |
| La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                    | 1150 (разл.) | —               | —                        | —                                      | —               | MnTiO <sub>3</sub>                              | 1404         | 33,5            | —                        | —                                      | —               |
| LiBO <sub>2</sub>                                                  | 849          | 33,9            | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>                      | 920          | 120             | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiBr                                                               | 550          | 17,7            | 1290                     | 107                                    | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                    | 732          | 38              | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiCl                                                               | 610          | 19,7            | 1382                     | 121                                    | [4]             |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiClO <sub>3</sub>                                                 | 129          | —               | 300 (разл.)              | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiClO <sub>4</sub>                                                 | 246,7        | 17,0            | 400 (разл.)              | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiF                                                                | 849          | 27,1            | 1681                     | 147                                    | [2]             |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>2</sub> GeO <sub>3</sub>                                   | 1239         | —               | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiH                                                                | 691          | 22              | 1680                     | 213,5                                  | [2]             |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiI                                                                | 469          | 14,6            | 1170                     | 97                                     | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>                                   | 703          | 49,0            | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>3</sub> N                                                  | 813          | —               | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiNH <sub>2</sub>                                                  | 375          | —               | 430 (разл.)              | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiNO <sub>3</sub>                                                  | 253,0        | 25,5            | >600 (разл.)             | —                                      | [4]             |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>2</sub> O                                                  | 1727         | 58,6            | 2600                     | 234,5                                  | [3]             |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| LiOH                                                               | 473          | 20,1            | 925 (разл.)              | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                    | 1220         | —               | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>2</sub> S                                                  | 1370         | —               | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |
| Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                    | 860          | 9,3             | —                        | —                                      | —               |                                                 |              |                 |                          |                                        |                 |

| Вещество                                      | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура | Вещество                                                         | $t_{пл}$    | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура |
|-----------------------------------------------|--------------|-----------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| MoB                                           | 2550         | —               | —                       | —                                     | [7]             | Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>                                 | 794         | 24,7            | —                       | —                                     | —               |
| MoB <sub>2</sub>                              | 2350 (разл.) | —               | —                       | —                                     | [7]             | NaF                                                              | 996         | 33,5            | 1704                    | 177                                   | [4]             |
| $\alpha$ -MoC                                 | 2600         | —               | —                       | —                                     | [7]             | NaH                                                              | 200 (разл.) | —               | —                       | —                                     | [2]             |
| $\beta$ -MoC <sub>2</sub>                     | 2522         | —               | —                       | —                                     | [7]             | NaHSO <sub>4</sub>                                               | 186         | 10,4            | —                       | —                                     | —               |
| MoCl <sub>5</sub>                             | 194          | 18              | 269                     | 54                                    | —               | NaI                                                              | 661         | 23,7            | 1304                    | 1597                                  | [4]             |
| MoF <sub>4</sub>                              | 97           | 31,4            | 617                     | 83,7                                  | [2]             | NaIO <sub>3</sub>                                                | 422         | 23,7            | —                       | —                                     | —               |
| MoF <sub>6</sub>                              | 17,6         | 4,3             | 33,9                    | 27,2                                  | —               | Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>                                 | 688         | 22              | —                       | —                                     | —               |
| MoF <sub>4</sub> O                            | 97,2         | 3,5             | 186                     | 50                                    | —               | NaNH <sub>2</sub>                                                | 208         | —               | 400                     | —                                     | —               |
| MoO <sub>2</sub>                              | 1927         | 67              | 1977 (разл.)            | —                                     | [3]             | NaNO <sub>2</sub>                                                | 284         | 14,9            | >320 (разл.)            | —                                     | —               |
| MoO <sub>3</sub>                              | 801          | 49,0            | 1257                    | 138                                   | [3]             | NaNO <sub>3</sub>                                                | 306,5       | 15,1            | 380 (разл.)             | —                                     | —               |
| MoSi <sub>2</sub>                             | 2020         | —               | —                       | —                                     | —               | NaO <sub>2</sub>                                                 | 552         | 26,0            | 1027                    | 117                                   | [2, 3]          |
| NCl <sub>3</sub>                              | —27          | —               | 71 (взр.)               | —                                     | [5]             | Na <sub>2</sub> O                                                | 920         | 29,7            | 1350                    | —                                     | [3]             |
| NF <sub>3</sub>                               | —206,8       | 0,398           | —129,0                  | 11,55                                 | [4]             | Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                                   | 596         | 16,7            | (разл.)                 | —                                     | [3]             |
| NH <sub>3</sub>                               | —77,75       | 5,66            | —33,41                  | 23,33                                 | —               | NaOH                                                             | 322         | 6,4             | 1378                    | 144,3                                 | [4]             |
| N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>                 | 1,54         | 12,66           | 113,5                   | 41,6                                  | [4]             | NaPO <sub>3</sub>                                                | 628         | 17,3            | —                       | —                                     | —               |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>               | 169,6        | 6,40            | 210 (разл.)             | —                                     | —               | Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                  | 1510        | —               | —                       | —                                     | —               |
| NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>              | 146,9        | 14,2            | разл.                   | —                                     | —               | Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                    | 998         | 59              | —                       | —                                     | —               |
| NH <sub>2</sub> OH                            | 32           | 16              | 58                      | 47,7                                  | [4]             | Na <sub>2</sub> S                                                | 1168        | 30,1            | —                       | —                                     | —               |
| NH <sub>4</sub> SCH                           | 149,6        | —               | 170 (разл.)             | —                                     | —               | NaSCN                                                            | 307,5       | —               | —                       | —                                     | —               |
| NO                                            | —163,7       | 2,30            | —151,65                 | 13,783                                | [3]             | Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>                                  | 911         | 26              | —                       | —                                     | —               |
| N <sub>2</sub> O                              | —91,0        | 6,544           | —88,5                   | 16,571                                | [3]             | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                  | 884         | 24,3            | 890                     | 24,07                                 | [2]             |
| N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | —101         | —               | —40 (разл.)             | —                                     | —               | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O              | 32,4        | 79,0            | разл.                   | —                                     | —               |
| N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                 | —11,2        | 14,662          | 21                      | 38,56                                 | [3]             | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O | 48,5        | 23,4            | 100                     | —                                     | —               |
| N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                 | —            | субл.           | 33                      | 56,94                                 | [3]             | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                    | 402         | 40,8            | 460 (разл.)             | —                                     | —               |
| NOBr                                          | —55,5        | —               | —2                      | —                                     | —               | Na <sub>3</sub> Sb                                               | 1010        | 77              | —                       | —                                     | [4]             |
| NOCl                                          | —59,6        | 4               | —5,8                    | 25,1                                  | —               | Na <sub>2</sub> Se                                               | 875         | —               | —                       | —                                     | —               |
| NO <sub>2</sub> Cl                            | —141         | —               | —14,3                   | 25,7                                  | —               | Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>                                 | 846         | 99,6            | —                       | —                                     | —               |
| NO <sub>3</sub> Cl                            | —107         | —               | 18                      | 305                                   | [4]             | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                 | 1088        | 54              | —                       | —                                     | —               |
| NOF                                           | —132,5       | —               | —59,9                   | 19,2                                  | —               | Na <sub>2</sub> Te                                               | 1035        | 14              | —                       | —                                     | —               |
| N <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                 | 21           | —               | 100 (взр.)              | —                                     | —               | NaVO <sub>3</sub>                                                | 630         | 28,3            | —                       | —                                     | —               |
| NSF                                           | —79          | —               | 4,8                     | 22,2                                  | [4]             | Na <sub>2</sub> WO <sub>3</sub>                                  | 696         | 31              | —                       | —                                     | —               |
| NaAlSiO <sub>4</sub>                          | 1526         | —               | —                       | —                                     | —               | NbB <sub>2</sub>                                                 | 3050        | —               | —                       | —                                     | —               |
| NaBF <sub>4</sub>                             | 406          | 13,6            | —                       | —                                     | —               | NbBr <sub>5</sub>                                                | 267,5       | 36              | 362                     | 75,7                                  | —               |
| NaBO <sub>2</sub>                             | 966          | 36              | 1434                    | —                                     | —               | NbC                                                              | 3613        | —               | 4500                    | —                                     | [7]             |
| Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> | 742          | 81              | >1000 (разл.)           | —                                     | —               | NbCl <sub>5</sub>                                                | 205         | 33,9            | 247,5                   | 52,3                                  | —               |
| NaBr                                          | 747          | 26,2            | 1392                    | 128                                   | [5]             | NbF <sub>5</sub>                                                 | 79,5        | 12,2            | 234,5                   | 51,0                                  | —               |
| NaCN                                          | 564          | 18              | 1497                    | 156                                   | [4]             | NbN                                                              | 2300        | —               | —                       | —                                     | [7]             |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>               | 858          | 28,0            | разл.                   | —                                     | —               | NbO                                                              | 1940        | 67              | —                       | —                                     | [3]             |
| NaCl                                          | 801          | 28,2            | 1490                    | 138                                   | —               | NbO <sub>2</sub>                                                 | 2080        | 67              | 3527                    | 356                                   | [3]             |
| NaClO <sub>3</sub>                            | 263          | 21,3            | —                       | —                                     | —               | Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                   | 1490        | 103,3           | 2927                    | 334,9                                 | [3]             |
|                                               |              |                 |                         |                                       |                 | NdBr <sub>3</sub>                                                | 683         | 33,5            | 1614                    | 195,8                                 | [2, 4]          |

| Вещество                                      | $t_{пл}$    | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл.}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл.}$ | Лите-<br>ратура | Вещество                        | $t_{пл}$    | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл.}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл.}$ | Лите-<br>ратура |
|-----------------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| NdC <sub>2</sub>                              | 2207        | —               | —                         | —                                       | [7]             | Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>  | 830         | —               | —                         | —                                       | [3]             |
| NdCl <sub>3</sub>                             | 760         | 50,2            | 1620                      | 209                                     | —               | Pb(OH) <sub>2</sub>             | 145         | —               | —                         | —                                       | —               |
| NdF <sub>3</sub>                              | 1380        | 54,7            | 2300                      | 259                                     | [2]             | PbS                             | 1077        | 36,4            | 1281                      | 229,4                                   | [2]             |
| NdI <sub>3</sub>                              | 787         | 33,5            | 1350                      | 172                                     | [2]             | PbSO <sub>4</sub>               | 1087        | 40,2            | —                         | —                                       | [4]             |
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 2212        | 92,1            | 3000                      | —                                       | [3]             | PbSe                            | 1065        | 49,4            | —                         | —                                       | [6]             |
| NiBr <sub>2</sub>                             | —           | субл.           | 919                       | 224,6                                   | —               | PbTe                            | 917         | 57,4            | —                         | —                                       | [6]             |
| Ni(CO) <sub>4</sub>                           | —19,3       | 13,8            | 42,3                      | 29,8                                    | —               | PbWO <sub>4</sub>               | 1125        | —               | —                         | —                                       | —               |
| NiCl <sub>2</sub>                             | —           | субл.           | 970                       | 225                                     | —               | PdCl <sub>2</sub>               | 678         | 40,6            | 1030                      | 126                                     | [2]             |
| NiF <sub>2</sub>                              | 1157        | 37,3            | 1877                      | 230                                     | [2]             | PdF <sub>2</sub>                | 952         | 27,6            | 1730                      | 180                                     | [2]             |
| NiI <sub>2</sub>                              | 797         | —               | —                         | —                                       | —               | PdI <sub>2</sub>                | 350 (разл.) | —               | —                         | —                                       | —               |
| NiO                                           | 1957        | 50,7            | —                         | —                                       | [3]             | PdO                             | 877 (разл.) | —               | —                         | —                                       | [3]             |
| Ni(OH) <sub>2</sub>                           | 230         | —               | —                         | —                                       | —               | PdS                             | 950 (разл.) | —               | —                         | —                                       | —               |
| Ni <sub>3</sub> P                             | 1110        | —               | —                         | —                                       | —               | PdSe <sub>2</sub>               | 1000        | —               | —                         | —                                       | —               |
| NiS                                           | 996         | 44,1            | —                         | —                                       | [4]             | PmBr <sub>3</sub>               | 687         | 33,5            | 1520                      | 188                                     | [2]             |
| NiSO <sub>4</sub>                             | 840 (разл.) | —               | —                         | —                                       | —               | PoCl                            | 294         | 21,8            | 480                       | 79,6                                    | [2]             |
| NiSb                                          | 1160        | —               | 1400 (разл.)              | —                                       | —               | PoCl <sub>2</sub>               | —           | субл.           | 195                       | —                                       | —               |
| Ni <sub>2</sub> Si                            | 1318        | 50,24           | —                         | —                                       | [4]             | PoO <sub>2</sub>                | 552         | 23              | разл.                     | —                                       | —               |
| NpCl <sub>3</sub>                             | 802         | 41,9            | 1530                      | 167                                     | [2]             | PrBr <sub>3</sub>               | 693         | 47,3            | 1695                      | 167                                     | —               |
| NpCl <sub>4</sub>                             | 538         | 46,1            | 847                       | 117                                     | [2]             | PrC <sub>2</sub>                | 2120        | —               | 2500 (разл.)              | —                                       | [7]             |
| NpF <sub>4</sub>                              | 827         | 50,2            | 1477                      | 192,6                                   | [2]             | PrCl <sub>3</sub>               | 786         | 50,6            | 1630                      | 213                                     | —               |
| NpF <sub>6</sub>                              | 54,8        | 17,5            | 55,9                      | 29,5                                    | —               | PrF <sub>3</sub>                | 1370        | 33,5            | 2330                      | 259,6                                   | [2]             |
| NpO <sub>2</sub>                              | 2560        | 62,8            | —                         | —                                       | [3]             | Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 2127        | 92,1            | 3727                      | 376,8                                   | [3]             |
| O <sub>3</sub>                                | —192,5      | 2,09            | —111,9                    | 15,193                                  | [3]             | PtCl <sub>3</sub>               | 435         | —               | разл.                     | —                                       | —               |
| OsCl <sub>4</sub>                             | 97          | 13,8            | 330                       | 50                                      | [2]             | PtF <sub>3</sub>                | 852         | 37,3            | 1200                      | 159                                     | [2]             |
| OsF <sub>2</sub>                              | 1080        | 15,9            | 1630                      | 213                                     | [2]             | PtF <sub>6</sub>                | 61,3        | 5               | 69,2                      | 30                                      | —               |
| OsF <sub>8</sub>                              | 33,4        | 7               | 47,5                      | 27,6                                    | [8]             | PtO <sub>2</sub>                | 450         | 19,26           | 477 (разл.)               | —                                       | [3]             |
| OsO <sub>4</sub> (желтый)                     | 39,50       | 14,28           | 130                       | 37,3                                    | [3]             | PtP <sub>2</sub>                | >1500       | —               | —                         | —                                       | [7]             |
| PBr                                           | —40,5       | —               | 173,3                     | 38,7                                    | —               | PuBr <sub>3</sub>               | 681         | 51              | 1512                      | 184                                     | [4]             |
| PCl <sub>3</sub>                              | —90,3       | 4,52            | 75,3                      | 30,5                                    | [4]             | PuCl <sub>3</sub>               | 765         | 56              | 1770                      | 195,6                                   | [4]             |
| PF <sub>3</sub>                               | —151,3      | 0,94            | —101,4                    | 14,6                                    | —               | PuCl <sub>4</sub>               | 457         | 39,8            | 790                       | 126                                     | [2]             |
| PF <sub>5</sub>                               | —93,7       | 11,9            | —84,55                    | 17,2                                    | —               | PuF <sub>2</sub>                | 1410        | 54              | 2280                      | 259                                     | [2]             |
| PH <sub>3</sub>                               | —133,8      | 1,13            | —87,42                    | 14,6                                    | —               | PuF <sub>3</sub>                | 1426        | 33              | —                         | —                                       | [4]             |
| PH <sub>2</sub> Cl                            | —           | субл.           | —28                       | —                                       | —               | PuF <sub>4</sub>                | 1037        | 58,6            | 1427                      | 197                                     | [2]             |
| PH <sub>4</sub> I                             | 18,5        | —               | 80                        | —                                       | —               | PuF <sub>6</sub>                | 51,6        | 18,7            | 62,2                      | 30,1                                    | —               |
| PI <sub>3</sub>                               | 61,0        | —               | 227                       | 43,9                                    | [4]             | PuI <sub>3</sub>                | 777         | 50,2            | —                         | —                                       | [2]             |
| (PNCI <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>             | 114         | 20,9            | 255                       | 55,2                                    | [4]             | PuO                             | 1017        | 30,14           | 2052                      | 196,8                                   | [3]             |
| (PNF <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>              | 27,8        | 21,8            | 50,9                      | 31,8                                    | [4]             | PuO <sub>2</sub>                | 2390        | 62,8            | 3327                      | 376,8                                   | [3]             |
| P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | 23,9        | 14,07           | 175,4                     | 18,84                                   | [3]             | Pu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 2085        | 67              | 2977                      | 314                                     | [3]             |
| P <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                 | —           | субл.           | 100                       | —                                       | [3]             | RaBr <sub>2</sub>               | 728         | —               | 900                       | —                                       | —               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                 | —           | субл.           | 359                       | 65                                      | —               | RaCl <sub>2</sub>               | 900         | 25,1            | 1610                      | 176                                     | [2]             |
| гекс.                                         | —           | субл.           | 584                       | 79,13                                   | —               | RaF <sub>2</sub>                | 1330        | 12,6            | 1930                      | 230                                     | [2]             |
| ромб.                                         | 420         | ≈65             | 588                       | —                                       | [3]             | RbBr                            | 692         | 23,3            | 1352                      | 141,8                                   | [4]             |
| (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub> | 562         | —               | 588                       | —                                       | [3]             | RbCl                            | 723         | 23,7            | 1390                      | 149                                     | —               |
| POBr <sub>3</sub>                             | 55,7        | —               | 192                       | 45,6                                    | —               | Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 835         | 29              | разл.                     | —                                       | —               |
| POCl <sub>3</sub>                             | 1,2         | 13,1            | 107,2                     | 34,5                                    | —               | RbF                             | 795         | 25,8            | 1430                      | 159                                     | —               |
| POF <sub>3</sub>                              | —           | субл.           | —39,5                     | 37,7                                    | —               | RbI                             | 656         | 22,0            | 1327                      | 135                                     | —               |
| P <sub>4</sub> S <sub>3</sub>                 | 172         | —               | 407                       | —                                       | —               | RbNO <sub>3</sub>               | 312         | 4,6             | —                         | —                                       | —               |
| α-PSCl <sub>3</sub>                           | —40,8       | —               | 125                       | 63,2                                    | —               | RbO <sub>2</sub>                | 412         | 17,2            | 567 (разл.)               | —                                       | [3]             |
| PaCl <sub>5</sub>                             | 301         | 39,4            | 380                       | 63                                      | [2,4]           | Rb <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 570         | 30,5            | 1010 (разл.)              | —                                       | [3]             |
| PaF <sub>3</sub>                              | 1280        | 36,8            | 2280                      | 251                                     | [2]             | RbOH                            | 385         | 8,9             | —                         | —                                       | —               |
| PaF <sub>5</sub>                              | 297         | 28,5            | 587                       | 83,7                                    | [2]             | Rb <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 1070        | 38,4            | 1700                      | —                                       | —               |
| Pa <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                | 1777        | 108,9           | 3077                      | 398                                     | [3]             | ReCl <sub>3</sub>               | 660         | 50,2            | 830                       | 113                                     | [2]             |
| PbBr <sub>2</sub>                             | 370         | 21              | 893                       | 118                                     | —               | ReCl <sub>5</sub>               | 278         | 37,7            | 330                       | 58,6                                    | [2]             |
| PbCl <sub>2</sub>                             | 495         | 24              | 953                       | 129                                     | —               | ReCl <sub>3</sub> O             | 4,5         | —               | 131                       | —                                       | —               |
| PbCl <sub>4</sub>                             | —7          | 10,0            | 127                       | 34,3                                    | [2]             | ReF <sub>4</sub>                | 125         | 30,1            | 500 (разл.)               | —                                       | [2]             |
| взр. около 100°C                              | —           | —               | —                         | —                                       | —               | ReF <sub>6</sub>                | 18,8        | 4,6             | 33,7                      | 28,3                                    | —               |
| PbF <sub>2</sub>                              | 822         | 11,9            | 1292                      | 160,2                                   | —               | ReO <sub>2</sub>                | 1202        | 50,2            | 2977                      | 334,9                                   | [3]             |
| PbI <sub>2</sub>                              | 412         | 21              | 872                       | 100                                     | —               | ReO <sub>3</sub>                | 160         | 21,8            | 620                       | —                                       | [3]             |
| PbMoO <sub>4</sub>                            | 1070        | —               | —                         | —                                       | —               | ReO <sub>4</sub>                | 147         | 17,58           | 187                       | 38,94                                   | [3]             |
| PbO                                           | 886         | 25,52           | 1472                      | 214                                     | [3]             | Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>  | 301,5       | 66,2            | 359                       | 69,9                                    | [3]             |
| PbO <sub>2</sub>                              | 290 (разл.) | —               | —                         | —                                       | [3]             | RhCl <sub>2</sub>               | 780         | 26,4            | 960 (разл.)               | —                                       | [2]             |
|                                               |             |                 |                           |                                         |                 | RhF <sub>3</sub>                | 1187        | 46,0            | 1427                      | 167,5                                   | [2]             |

| Вещество                                        | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура | Вещество                          | $t_{пл}$     | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура |
|-------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------|
| Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 1115 (разл.) | —               | —                        | —                                      | [3]             | тридимит                          | 1680         | 9,002           | —                        | —                                      | [3]             |
| RuCl <sub>3</sub>                               | >500 (разл.) | —               | —                        | —                                      | —               | SiS <sub>2</sub>                  | 1090         | —               | 1130                     | —                                      | [2]             |
| RuF <sub>5</sub>                                | 101          | 188,4           | 227                      | 56                                     | [2]             | SmBr <sub>2</sub>                 | 669          | 25,12           | 1880                     | —                                      | [2]             |
| RuO <sub>4</sub>                                | 25,4         | 10,89           | 100 (разл.)              | —                                      | [3]             | SmBr <sub>3</sub>                 | 664          | —               | 1645                     | 192,9                                  | [4]             |
| RuS <sub>2</sub>                                | 1000 (разл.) | —               | —                        | —                                      | —               | SmCl <sub>2</sub>                 | 858          | 14              | 1950                     | 218                                    | —               |
| S <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>                  | -40          | —               | 90                       | —                                      | —               | SmCl <sub>3</sub>                 | 678          | 33,5            | 1560                     | 197                                    | [2]             |
| SCl <sub>2</sub>                                | -123         | —               | 59 (разл.)               | —                                      | —               | SmF <sub>3</sub>                  | 1400         | 33,5            | 2330                     | 259                                    | [2]             |
| S <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>                  | -82          | —               | 137 (разл.)              | —                                      | —               | SmI <sub>2</sub>                  | 520          | 21              | 1660                     | 167                                    | [2]             |
| SF <sub>4</sub>                                 | -121,0       | —               | -38                      | 21,8                                   | —               | Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 2320         | 83,74           | 3527                     | 340                                    | [3]             |
| SF <sub>6</sub>                                 | —            | субл.           | -63,6                    | 22,8                                   | [4]             | Sm <sub>2</sub> S <sub>3</sub>    | 1900         | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| S <sub>2</sub> F <sub>2</sub>                   | -165         | —               | -11                      | 22,8                                   | —               | SnBr <sub>2</sub>                 | 232          | 7               | 641                      | 97                                     | —               |
| SO <sub>2</sub>                                 | -75,46       | 7,406           | -10,01                   | 24,95                                  | [3]             | SnBr <sub>4</sub>                 | 30           | 11              | 208                      | 37                                     | —               |
| $\alpha$ -SO <sub>3</sub>                       | —            | субл.           | 62,2                     | 30                                     | —               | SnBr <sub>2</sub> I <sub>2</sub>  | 50           | —               | 225                      | —                                      | —               |
| $\beta$ -SO <sub>3</sub>                        | 32,5         | 12,4            | 44,7                     | 40,82                                  | [3]             | SnCl <sub>2</sub>                 | 247          | 12,6            | 670                      | 71                                     | —               |
| $\gamma$ -SO <sub>3</sub>                       | 16,79        | 5,61            | 44,7                     | 40,82                                  | [3]             | SnCl <sub>4</sub>                 | -33          | 9,16            | 112                      | 37                                     | [4]             |
| SOBr <sub>2</sub>                               | -52          | —               | 138                      | 42,7                                   | [4]             | SnF <sub>2</sub>                  | 212          | 13,8            | 853                      | 113                                    | [2]             |
| SOCl <sub>2</sub>                               | -104,5       | —               | 75,6                     | 31,8                                   | —               | SnF <sub>4</sub>                  | 447          | 27,6            | 705                      | 92,1                                   | [2]             |
| SOCIF                                           | -139,5       | —               | 12,2                     | 24,8                                   | [4]             | SnH <sub>4</sub>                  | -150         | —               | 51,8                     | 19,05                                  | [4]             |
| SOF <sub>2</sub>                                | -110,5       | —               | -43,8                    | 21,8                                   | —               | SnI <sub>2</sub>                  | 320          | 12,6            | 718                      | 105                                    | [4]             |
| SOF <sub>6</sub>                                | -86,0        | —               | -35,1                    | 21,8                                   | [4]             | SnI <sub>4</sub>                  | 144,5        | 19,2            | 348,6                    | 50                                     | —               |
| SbBr <sub>3</sub>                               | 96,6         | 15              | 289                      | 51,2                                   | —               | SnO                               | 1042         | 26,8            | 1527                     | 251,2                                  | [3]             |
| SbCl <sub>3</sub>                               | 73,2         | 13              | 233                      | 46                                     | —               | SnO <sub>2</sub>                  | 1625         | 47,7            | 2500                     | 314                                    | [2, 3]          |
| SbCl <sub>5</sub>                               | 3,0          | 10,0            | 172 (разл.)              | —                                      | —               | SnS                               | 881          | 31,6            | 1276                     | 156                                    | —               |
| SbF <sub>3</sub>                                | 292          | 16,3            | 319                      | 58,6                                   | [2]             | SnSO <sub>4</sub>                 | 360 (разл.)  | —               | —                        | —                                      | —               |
| SbF <sub>5</sub>                                | 8,3          | —               | 142,7                    | 43                                     | —               | SnTe                              | 780          | 45,2            | разл.                    | —                                      | [6]             |
| SbH <sub>3</sub>                                | -94          | —               | -18                      | 21                                     | —               | SrB <sub>6</sub>                  | 2235         | —               | 5100                     | —                                      | [7]             |
| SbI <sub>3</sub>                                | 170,5        | 18              | 401,6                    | 61                                     | —               | SrBr <sub>2</sub>                 | 657          | 10,1            | 1970                     | 230                                    | —               |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 656          | 110             | 1456                     | 37,35                                  | [3]             | SrC <sub>2</sub>                  | >1700        | —               | —                        | —                                      | —               |
| Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                  | 560          | 65,3            | 1160                     | —                                      | [3]             | SrCl <sub>2</sub>                 | 874          | 16,1            | 2040                     | 243                                    | —               |
| Sb <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>                 | 612          | 77,4            | —                        | —                                      | [6]             | SrF <sub>2</sub>                  | 1477         | 28,5            | 2460                     | 324                                    | —               |
| Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>                 | 621          | 100,1           | —                        | —                                      | [6]             | SrI <sub>2</sub>                  | 538          | 19,7            | 1900                     | 194                                    | —               |
| ScCl <sub>3</sub>                               | 960          | —               | 967                      | —                                      | [4]             | Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 645          | 49              | —                        | —                                      | —               |
| Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 2405         | 96,3            | —                        | —                                      | [3]             | SrO                               | 2415         | 69,9            | 3000                     | 534,2                                  | [3]             |
| Sc <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 973          | —               | —                        | —                                      | —               | SrS                               | >2000        | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| SeBr <sub>2</sub> O                             | 41,6         | —               | разл.                    | —                                      | —               | SrSO <sub>4</sub>                 | 1605         | —               | —                        | —                                      | —               |
| SeC <sub>2</sub>                                | 45,5         | —               | 125                      | —                                      | —               | SrSe                              | 1600         | —               | —                        | —                                      | —               |
| SeCl <sub>3</sub>                               | 956          | 67,4            | 975                      | 157                                    | —               | SrSiO <sub>3</sub>                | 1580         | —               | —                        | —                                      | —               |
| SeCl <sub>4</sub>                               | —            | субл.           | 196                      | 87,9                                   | [2]             | SrTe                              | 1490         | 57              | —                        | —                                      | —               |
| SeF <sub>4</sub>                                | -9,5         | —               | 107,7                    | 47,02                                  | [4]             | SrWO <sub>4</sub>                 | 1535 (разл.) | —               | —                        | —                                      | —               |
| SeF <sub>6</sub>                                | —            | субл.           | -46,6                    | 18,3                                   | —               | T <sub>2</sub> O                  | 4,49         | —               | 101,6                    | 46,05<br>(25° C)                       | [3]             |
| SeO                                             | 1102         | 31,82           | 1802                     | 188,4                                  | [3]             | TaBr <sub>5</sub>                 | 265          | 45,6            | 348,8                    | 62,3                                   | [4]             |
| SeO <sub>2</sub>                                | —            | субл.           | 337                      | 84,6                                   | [3]             | TaC                               | 3985         | —               | 5500                     | —                                      | [7]             |
| SeO <sub>3</sub>                                | 118,5        | 7,1             | >185 (разл.)             | —                                      | —               | TaCl <sub>2</sub>                 | 937          | 28,5            | 1377                     | 167                                    | [2]             |
| SeOCl <sub>2</sub>                              | 10,8         | 4,23            | 117,6                    | 42,7                                   | —               | TaCl <sub>5</sub>                 | 216,5        | 34              | 236                      | 56,1                                   | —               |
| SiBr <sub>4</sub>                               | 5,4          | —               | 152,6                    | 35                                     | —               | TaF <sub>5</sub>                  | 96           | 12,6            | 229,2                    | 51,9                                   | —               |
| SiC                                             | 2540         | —               | 2830 (разл.)             | —                                      | [7]             | TaI <sub>5</sub>                  | 365          | 6,7             | 543                      | 75,8                                   | [4, 5]          |
| SiCl <sub>4</sub>                               | -68,9        | 7,7             | 57,0                     | 28,6                                   | —               | TaN                               | 3087 (разл.) | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| SiCl <sub>6</sub>                               | -1,0         | —               | 145                      | 42                                     | [4]             | Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :  | —            | —               | —                        | —                                      | —               |
| SiF <sub>4</sub>                                | —            | субл.           | -95,25                   | 15,4                                   | —               | ромб.                             | 1785         | 67              | 2227                     | —                                      | [3]             |
| SiH <sub>4</sub>                                | -185         | 0,67            | -111,9                   | 12,4                                   | —               | триклин.                          | 1872         | 67              | 2227                     | —                                      | [3]             |
| Si <sub>3</sub> H <sub>6</sub>                  | -131         | —               | -14,5                    | 21,3                                   | —               | TbCl <sub>3</sub>                 | 588          | —               | —                        | —                                      | [4]             |
| Si <sub>4</sub> H <sub>10</sub>                 | -84,3        | —               | 108                      | 34,3                                   | [5]             | TcCl <sub>5</sub>                 | 152          | 32,7            | 232                      | 50,2                                   | [2]             |
| SiH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>                 | -122         | 4               | -77,8                    | 16,3                                   | [4]             | TcF <sub>6</sub>                  | 36           | 9,6             | 57                       | 27,6                                   | [2]             |
| SiI <sub>4</sub>                                | 120,5        | —               | 301                      | 50,2                                   | [4]             | TcO <sub>2</sub>                  | 2127         | 75,4            | 3727                     | 439,6                                  | [3]             |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>                  | —            | субл.           | 1900                     | —                                      | —               | Tc <sub>2</sub> O <sub>7</sub>    | 120          | 47,5            | 311                      | 58,8                                   | [3]             |
| SiO                                             | 2277         | 50,24           | —                        | —                                      | [3]             | TeBr <sub>4</sub>                 | 380          | —               | 421                      | —                                      | —               |
| SiO <sub>2</sub> :                              | —            | —               | —                        | —                                      | —               | TeCl <sub>2</sub>                 | 208          | 14,7            | 328                      | 64,1                                   | [2]             |
| кварц                                           | 1610         | 8,541           | 1997 (разл.)             | —                                      | [3]             | TeCl <sub>4</sub>                 | 224          | 18,9            | 390                      | 71,1                                   | —               |
| кристаллит                                      | 1720         | 7,704           | 2950                     | 573,6<br>(25° C)                       | [3]             | TeF <sub>4</sub>                  | 129,6        | 26,57           | 374,5                    | 52,8                                   | [4]             |
|                                                 |              |                 |                          |                                        |                 | TeF <sub>6</sub>                  | —            | субл.           | -38,6                    | 27                                     | —               |
|                                                 |              |                 |                          |                                        |                 | TeO <sub>2</sub>                  | 733          | 29,5            | 1257                     | 205,2                                  | [3]             |



| Вещество                         | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура | Вещество                          | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ | Лите-<br>ратура |
|----------------------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------|
| ThB <sub>6</sub>                 | 2190     | —               | —                        | —                                      | [7]             | US <sub>2</sub>                   | 1600     | —               | —                        | —                                      | —               |
| ThBr <sub>4</sub>                | 679      | 34              | 857                      | 140                                    | —               | VC                                | 2810     | —               | 3900                     | —                                      | —               |
| ThC                              | 2635     | —               | 5000                     | —                                      | [2]             | VCl <sub>2</sub>                  | 1000     | 33,5            | 1375                     | 147                                    | [2]             |
| ThCl <sub>4</sub>                | 770      | 61              | 921                      | 129                                    | —               | VCl <sub>4</sub>                  | —20,5    | 9,6             | 153                      | 36                                     | —               |
| ThF <sub>4</sub>                 | 1110     | 18,8            | 1650                     | 270,3                                  | —               | VCl <sub>3</sub> O                | —78      | 9,6             | 126,7                    | 34,7                                   | —               |
| ThI <sub>4</sub>                 | 566      | 33,5            | 837                      | 125                                    | [2]             | VF <sub>3</sub>                   | 1127     | 54,4            | 1627                     | 230                                    | —               |
| ThO                              | 1877     | 54,4            | 2977                     | 272,1                                  | [3]             | VF <sub>5</sub>                   | 19,5     | 4,2             | 48,0                     | 43,9                                   | —               |
| ThO <sub>2</sub>                 | 3050     | 90              | 4400                     | 752,3                                  | [7]             | VN                                | 2050     | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| ThSiO <sub>4</sub>               | 1975     | (разл.)         | —                        | —                                      | —               | VO                                | 1830     | 62,8            | 3127                     | 293,1                                  | [3]             |
| TiB <sub>2</sub>                 | 2790     | —               | —                        | —                                      | [7]             | VO <sub>2</sub>                   | 1545     | 57              | 2700                     | —                                      | [3]             |
| TiBr <sub>4</sub>                | 38       | 12,9            | 231                      | 44,4                                   | —               | V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1970     | 100,5           | 3027                     | (разл.)                                | [3]             |
| TiC                              | 3257     | —               | 4300                     | —                                      | [7]             | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>     | 680      | 65,15           | 2052                     | 264                                    | —               |
| TiCl <sub>2</sub>                | 1035     | 37,7            | 1330                     | 147                                    | [2]             | WB                                | 2800     | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| TiCl <sub>3</sub>                | 730      | 20,9            | 960                      | 124                                    | [4]             | WBr <sub>5</sub>                  | 295      | 17              | 392                      | 58                                     | —               |
| TiCl <sub>4</sub>                | —24,1    | 10,0            | 136,3                    | 35,7                                   | —               | WN                                | 309      | —               | >400                     | (разл.)                                | —               |
| TiF <sub>3</sub>                 | 1227     | 50,2            | 1400                     | 217,7                                  | [2]             | WBr <sub>6</sub> O                | 322      | 61              | 331                      | 55,2                                   | —               |
| TiF <sub>4</sub>                 | —        | субл.           | 285,5                    | 90                                     | —               | WC                                | 2785     | —               | 6000                     | —                                      | [7]             |
| TiI <sub>4</sub>                 | 155      | 19,8            | 379,5                    | 56                                     | —               | WC                                | 2795     | —               | 6000                     | —                                      | [7]             |
| TiN                              | 2950     | —               | —                        | —                                      | —               | W <sub>2</sub> C                  | 248      | 24              | 287                      | 49                                     | —               |
| β-TiO                            | 1780     | 54,43           | 2700                     | 563,2                                  | [3]             | WCl <sub>5</sub>                  | 283      | 8               | 340                      | 61,5                                   | —               |
| TiO <sub>2</sub>                 | 1870     | 67              | 2927                     | (разл.)                                | [3]             | WCl <sub>6</sub>                  | 209,5    | 33              | 224                      | 43                                     | —               |
|                                  | (21,3    | кПа)            | —                        | —                                      | —               | WCl <sub>4</sub> O                | 107      | 18,8            | 250                      | 48                                     | [2]             |
|                                  |          |                 | —                        | —                                      | —               | WF <sub>5</sub>                   | 2,0      | 4,1             | 17,3                     | 25,9                                   | —               |
| Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : |          |                 |                          |                                        |                 | WF <sub>6</sub>                   | 106      | 8               | 185,9                    | 56                                     | —               |
| моноклин.                        | 1830     | 110,5           | 3027                     | —                                      | [3]             | WF <sub>4</sub> O                 | 1570     | 48,15           | 1850                     | (разл.)                                | [3]             |
| гекс.                            | 2130     | —               | —                        | —                                      | [3]             | WO <sub>2</sub>                   | 1473     | 73,5            | 1670                     | 180                                    | [3]             |
| Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub>   | 2177     | —               | 3327                     | —                                      | [3]             | WO <sub>3</sub>                   | 2987     | —               | —                        | —                                      | [5]             |
| TiP                              | 1990     | (разл.)         | —                        | —                                      | —               | W <sub>2</sub> Re <sub>3</sub>    | 2160     | —               | —                        | —                                      | —               |
| TiS                              | 1780     | —               | —                        | —                                      | [7]             | WSi <sub>2</sub>                  | 140      | —               | —                        | 51 (25°C)                              | —               |
| TiBr                             | 460      | 16,4            | 824                      | 100                                    | —               | XeF <sub>2</sub>                  | 114      | —               | —                        | 64 (25°C)                              | —               |
| Tl <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>  | 269      | 18,4            | —                        | —                                      | —               | XeF <sub>4</sub>                  | 46       | —               | 76                       | —                                      | —               |
| TlCl                             | 431      | 15,6            | 820                      | 101                                    | —               | XeF <sub>6</sub>                  | 905      | 37,7            | 1324                     | —                                      | [2]             |
| TlF                              | 322      | 13,9            | 840                      | 94                                     | —               | YBr <sub>3</sub>                  | 721      | 31,5            | 1482                     | 210                                    | —               |
| TlF <sub>3</sub>                 | 550      | 35,6            | 927                      | 138                                    | [2]             | YCl <sub>3</sub>                  | 1155     | 23,4            | 1502                     | 184                                    | [2]             |
| TlO <sub>2</sub>                 | 579      | 30,3            | 600                      | 71,2                                   | [3]             | YF <sub>3</sub>                   | 997      | 50,2            | 1300                     | 172                                    | [2]             |
|                                  |          |                 | (1 кПа)                  | —                                      | —               | YI <sub>3</sub>                   | 2430     | 84              | 4300                     | —                                      | [3]             |
| Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 717      | 51,9            | разл.                    | —                                      | [3]             | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 673      | 25,1            | 1800                     | —                                      | [2]             |
| TlI                              | 441      | 14,7            | 833                      | (разл.)                                | —               | YbBr <sub>2</sub>                 | 702      | —               | 2033                     | 258                                    | —               |
| TlNO <sub>3</sub>                | 206,5    | 9,5             | 433                      | (разл.)                                | [5]             | YbCl <sub>2</sub>                 | 1162     | 29,7            | 2200                     | —                                      | —               |
| Tl <sub>2</sub> S                | 448      | 12,6            | 1180                     | 159                                    | [2]             | YbF <sub>3</sub>                  | 772      | 21              | 1330                     | 155                                    | [2]             |
| Tl <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | 632      | 24              | —                        | —                                      | —               | YbI <sub>2</sub>                  | 394      | 15,7            | 670                      | 109,6                                  | —               |
| TmBr <sub>3</sub>                | 945      | 41,9            | 1440                     | —                                      | [2]             | ZnBr <sub>2</sub>                 | 317      | 10,2            | 732                      | 119                                    | —               |
| TmCl <sub>3</sub>                | 845      | —               | —                        | —                                      | [4]             | ZnCl <sub>2</sub>                 | 875      | 41,8            | 1505                     | 185                                    | —               |
| TmI <sub>3</sub>                 | 1020     | 41,9            | 1260                     | 167                                    | [2]             | ZnF <sub>2</sub>                  | 446      | 17              | 624                      | (разл.)                                | —               |
| UB <sub>2</sub>                  | 2385     | —               | —                        | —                                      | [7]             | ZnI <sub>2</sub>                  | 1975     | —               | разл.                    | —                                      | —               |
| UBr <sub>3</sub>                 | 730      | 46              | —                        | —                                      | —               | ZnO                               | 1193     | 163,2           | —                        | —                                      | —               |
| UBr <sub>4</sub>                 | 519      | 72              | 765                      | 126                                    | —               | Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>    | —        | субл.           | 1182                     | 250,2                                  | [4,7]           |
| UC <sub>2</sub>                  | 2520     | —               | 4370                     | —                                      | [7]             | ZnS                               | —        | (разл.)         | —                        | —                                      | —               |
| UCl <sub>3</sub>                 | 841      | 37,7            | 1780                     | 197                                    | [2]             | ZnSO <sub>4</sub>                 | >600     | —               | —                        | —                                      | —               |
| UCl <sub>4</sub>                 | 590      | 50,0            | 792                      | 138,2                                  | [2]             | ZnSe                              | 1520     | 53,6            | —                        | —                                      | [6]             |
| UCl <sub>5</sub>                 | 287      | 36              | 417                      | 67,9                                   | [2]             | Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>  | 1511     | —               | —                        | —                                      | —               |
| UCl <sub>6</sub>                 | 179      | 20,9            | 277                      | 50,2                                   | [2]             | ZnTe                              | 1300     | 65              | —                        | —                                      | —               |
| UF <sub>3</sub>                  | 1495     | 37              | 2277                     | 255                                    | [2]             | ZrB <sub>2</sub>                  | 3050     | —               | —                        | —                                      | —               |
| UF <sub>4</sub>                  | 1036     | 47,0            | 1417                     | 200                                    | [2]             | Zr(BH <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> | 28,7     | 18,0            | 123                      | 38,9                                   | [4]             |
| UF <sub>5</sub>                  | 348      | 46,9            | 527                      | 75,4                                   | [2]             | ZrBr <sub>4</sub>                 | —        | субл.           | 355                      | 108                                    | —               |
| UF <sub>6</sub>                  | —        | субл.           | 56,5                     | 47,7                                   | —               | ZrC                               | 3530     | —               | 5100                     | —                                      | [7]             |
| UH <sub>3</sub>                  | >250     | (разл.)         | —                        | —                                      | —               | ZrCl <sub>2</sub>                 | 727      | 26,8            | 1387                     | 147                                    | [2]             |
| UI <sub>3</sub>                  | 680      | —               | 1750                     | —                                      | —               | ZrCl <sub>4</sub>                 | —        | субл.           | 333                      | 103,1                                  | —               |
| UI <sub>4</sub>                  | 520      | 23,6            | 769                      | —                                      | —               | ZrF <sub>4</sub>                  | —        | субл.           | 906                      | 261                                    | —               |
| UO                               | 2477     | 58,62           | —                        | —                                      | [3]             | ZrI <sub>4</sub>                  | —        | субл.           | 418                      | 120                                    | —               |
| UO <sub>2</sub>                  | 2840     | 136,1           | (разл.)                  | —                                      | [3]             | ZrN                               | 2980     | —               | —                        | —                                      | [7]             |
| US                               | 2462     | —               | —                        | —                                      | [7]             | ZrO <sub>2</sub>                  | 2900     | 87,1            | 4300                     | 639                                    | [3]             |
|                                  |          |                 |                          |                                        |                 | ZrSiO <sub>4</sub>                | 2430     | —               | —                        | —                                      | —               |

Таблица 12.3. Температура  $t$ , °С, и теплота плавления и кипения  $\Delta H$ , кДж/моль, органических соединений при нормальном давлении 101 325 Па. Обозначения те же, что в табл. 10.2 [4,13]

| Вещество                  | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}$ ,<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}$ ,<br>$\Delta H_{субл}$ | Вещество                      | $t_{пл}$      | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип}$ ,<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип}$ ,<br>$\Delta H_{субл}$ |
|---------------------------|----------|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| транс-Азобензол           | 68,5     | 24,7            | 293,0                     | —                                       | Валериановая кисло-<br>та     | —33,83        | 7,74            | 186,05                    | 44,0                                    |
| Азулен                    | 99       | 19,08           | 234                       | 55,84                                   | Винилацетат                   | —93,2         | —               | 73                        | 34,4                                    |
| Акриловая кислота         | 13       | 11,1            | 141,6                     | —                                       | Гексадекан                    | 18,6          | 53,36           | 286,8                     | —                                       |
| Акронитрил                | —83,5    | —               | 77,3                      | 32,6                                    | 1,5-Гексадиен                 | —140,7        | —               | 59,46                     | 28,58                                   |
| Акролеин                  | —87,0    | —               | 52,5                      | 28,85                                   | Гексаметилбензол              | 166,5         | 20,59           | 265                       | 53,85                                   |
| Аллиловый спирт           | —129     | —               | 97                        | 39,96                                   | Гексан                        | —95           | 13,03           | 68,95                     | 28,85                                   |
| Амилловый спирт           | —79      | 9,795           | 137,3                     | —                                       | 2-Гексанон                    | —57           | —               | 128                       | 34,5                                    |
| трет-Амилловый спирт      | —8,6     | 4,49            | 102,35                    | —                                       | транс-1, 3, 5-Гексат-<br>риен | —12           | —               | 78,5                      | 20,59                                   |
| Анетол                    | 21,4     | 16,0            | 234,5                     | —                                       | Гексафторэтан                 | —94           | 2,69            | —79                       | 16,15                                   |
| Анизол                    | —37,5    | —               | 153,80                    | 39,4                                    | Гексахлорбензол               | —             | субл.           | 322                       | —                                       |
| Анилин                    | —6,15    | 10,54           | 184,13                    | 45,15                                   | Гексахлорэтан [5]             | —             | субл.           | 184,4                     | 51,0                                    |
| Антрацен                  | 216,041  | 28,8            | 340                       | —                                       | 1-Гексен                      | —139,82       | 9,347           | 63,35                     | 28,03                                   |
| Ацетальдегид              | —121     | 3,22            | 20,8                      | 27,2                                    | цис-2-Гексен                  | —139,82       | —               | 67,87                     | 29,12                                   |
| Ацетамид                  | 82,3     | 14,2            | 221                       | —                                       | цис-3-Гексен                  | —137,82       | —               | 66,44                     | 28,70                                   |
| Ацетилен (этин)           | —        | субл.           | —84                       | 21,3                                    | Гексиловый спирт              | —46,7         | 15,38           | 158                       | 50,63                                   |
| Ацетилтиофен              | 10,4     | 15,0            | 213,9                     | 47,5                                    | 1-Гексин                      | —131,9        | —               | 71,3                      | —                                       |
| Ацетон                    | —95,4    | 5,72            | 56,2                      | 29,09                                   | Гептадекан                    | 22,0          | 40,48           | 301,8                     | —                                       |
| Ацетонитрил               | —44,9    | 8,91            | 81,5                      | 32,8                                    | Гептан                        | —90,6         | 14,02           | 98,42                     | 31,69                                   |
| Ацетофенон                | 19,75    | 16,65           | 202                       | 38,8                                    | 1-Гептен                      | —119          | 12,40           | 93,64                     | —                                       |
| Бензальдегид              | —26      | —               | 179,2                     | 40,9                                    | транс-2-Гептен                | —109,48       | —               | 98                        | —                                       |
| Бензил                    | 95       | 19,4            | 347,0                     | —                                       | Гептиловый спирт              | —34,1         | 18,17           | 176                       | —                                       |
| Бензиловый спирт          | —15,3    | 8,97            | 205,4                     | 50,46                                   | втор-Гептиловый<br>спирт      | —35,5         | —               | 151,45                    | 39,5                                    |
| Бензоил бромистый<br>[14] | 0,0      | —               | 218,5                     | —                                       | Гептилциклогексан             | —40,4         | 23,3            | 244                       | —                                       |
| Бензоил хлористый<br>[14] | —0,5     | —               | 197,2                     | —                                       | 1-Гептин                      | —81           | —               | 99,74                     | —                                       |
| Бензол                    | 5,51     | 9,837           | 80,099                    | 30,76                                   | Гидрокоричная кис-<br>лота    | 101,5         | 17,7            | 279,8                     | —                                       |
| Бензойная кислота         | 122,5    | 18,00           | 250,0                     | —                                       | Гидрохинон                    | 173,5         | —               | 285                       | —                                       |
| Бензонитрил               | —14      | 9,08            | 190,7                     | 45,80                                   | Гликолевая кислота            | 80            | 8,4             | 78                        | 8,8                                     |
| Бензотрифторид            | —29,11   | —               | 102,3                     | —                                       | Глицерин                      | 20            | 18,47           | 290 (разл.)               | —                                       |
| $\alpha$ -Бензофенон      | 48,21    | 16,7            | 305,9                     | —                                       | Глицин                        | 247,2 (разл.) | —               | —                         | —                                       |
| Бромбензол                | —30,82   | 10,63           | 156,06                    | 36,40                                   | Дейтерометан, CD <sub>4</sub> | —183,37       | 0,902           | —161,2                    | 8,276                                   |
| Бромбутан                 | —112,4   | 9,241           | 101,6                     | 32,53                                   | цис-Декалин                   | —43,0         | 9,489           | 195,8                     | 42,72                                   |
| Бромметан                 | —93,6    | 5,98            | 3,56                      | 23,90                                   | Декан                         | —29,7         | 28,71           | 174,1                     | —                                       |
| 1-Бромпропан              | —109,8   | 6,53            | 71,0                      | 29,9                                    | 1-Децен                       | —66,3         | 13,81           | 170,6                     | —                                       |
| 2-Бромпропан              | —89      | 6,53            | 59,4                      | 28,4                                    | Дециловая кислота             | 31,20         | 28,0            | 270                       | 61,34                                   |
| Бромуксусная кислота      | 49,5     | —               | 208                       | 54                                      | Дециловый спирт               | 7             | —               | 229                       | —                                       |
| Бромэтан                  | —118,6   | 5,9             | 38,40                     | 26,82                                   | 1, 4-Дибромбензол             | 87,5          | 20,0            | 220,4                     | —                                       |
| Бромэтилен                | —139,54  | 23,0            | 15,80                     | 25,9                                    | 1,2-Дибромбутан               | —65,4         | —               | 166                       | —                                       |
| 1,2-Бутадиен              | —136,19  | 6,961           | 10,85                     | —                                       | Дибромметан                   | —52,55        | 4,2             | 97                        | 36,0                                    |
| 1,3-Бутадиен (дивинил)    | —108,9   | 7,985           | —4,4                      | 22,59                                   | 1,2-Дибромпропан              | —55,2         | —               | 140                       | —                                       |
| Бутадиин                  | —36,4    | —               | 10,3                      | —                                       | 1,2-Дибромэтан                | 9,79          | 10,94           | 131,36                    | 36,2                                    |
| Бутан                     | —138,35  | 4,660           | —0,50                     | 22,39                                   | Дибутиловый эфир              | —95,3         | —               | 142,0                     | 36,92                                   |
| 2-Бутанон                 | —86,9    | 8,48            | 79,53                     | 32,8                                    | Дивиниловый эфир              | —101          | 7,95            | 28,35                     | 26,2                                    |
| 1-Бутантиоль              | —115,7   | 10,46           | 98,0                      | 32,23                                   | Дизоамиловый эфир             | —             | —               | 173,2                     | 35,1                                    |
| 1-Бутен (бутилен)         | —185,35  | 3,848           | —6,3                      | 21,92                                   | Диизопропиловый<br>эфир       | —85,9         | 11,24           | 68                        | 29,2                                    |
| цис-2-Бутен               | —139,91  | 7,308           | 3,7                       | 23,35                                   | Диметиламин                   | —92,2         | 5,939           | 7,4                       | 26,10                                   |
| транс-2-Бутен             | —105,55  | 9,757           | 0,88                      | 22,76                                   | N, N-Диметиланилин            | 2,45          | 11,42           | 194,15                    | 44,35                                   |
| 1-Бутин                   | —125,7   | 6,031           | 8,1                       | 24,52                                   | 2,2-Диметилбутан              | —99,87        | 0,579           | 49,74                     | 26,30                                   |
| 2-Бутин                   | —32,26   | 9,235           | 27                        | —                                       | 2,3-Диметилбутан              | —128,53       | 0,801           | 58                        | 27,28                                   |
| Бутилакрилат              | —64,6    | —               | 197,4                     | —                                       | 2,2-Диметил-1-Бутен           | —140,0        | —               | 55,6                      | 27,40                                   |
| Бутиламин                 | —50,5    | —               | 70                        | 27,2                                    | 3,3-Диметил-1-Бутен           | —115,2        | 10,95           | 41,2                      | 25,65                                   |
| Бутилбензол               | —87,99   | —               | 183,35                    | —                                       | 2,3-Диметил-2-Бутен           | —74,28        | 6,452           | 73,2                      | 29,64                                   |
| Бутилвиниловый<br>эфир    | —92      | —               | 93,5                      | 32,3                                    | 2,2-Диметилгексан             | —121,18       | 6,799           | 106,84                    | 32,3                                    |
| Бутиловый спирт           | —89,53   | 8,98            | 117,726                   | 43,97                                   | 2,5-Диметилгексан             | —91,2         | 12,86           | 109,0                     | 32,8                                    |
| втор-Бутиловый<br>спирт   | —114,7   | —               | 98,5                      | 43,56                                   | 2,2-Диметилгептан             | —113,0        | 8,95            | 130,5                     | 34,8                                    |
| трет-Бутиловый<br>спирт   | 25,5     | 6,79            | 82,25                     | 39,97                                   | 1,1-Диметилгидразин           | —57,2         | 10,07           | 62,5                      | 35,0                                    |
| Бутилпропионат            | —89,6    | —               | 144,5                     | 39,6                                    | Диметиловый эфир              | —138,5        | 4,94            | —23                       | 21,51                                   |
| Бутилформат               | —91,9    | —               | 106,8                     | 37,1                                    | Диметиллоксалат               | 49,5          | 21,0            | 163,3                     | 30,58                                   |

| Вещество                             | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>субл | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ | Вещество                           | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>субл | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ |
|--------------------------------------|----------|-----------------|--------------------|----------------------------------------|------------------------------------|----------|-----------------|--------------------|----------------------------------------|
| 2,2-Диметилпентан                    | -123,8   | 4,356           | 79,2               | 29,16                                  | Изобутиловый спирт [14]            | -108,0   | —               | 107,2              | 43,47                                  |
| 3,3-Диметилпентан                    | -134,5   | 7,067           | 86,1               | 29,64                                  | Изобутилпропионат                  | -71,4    | —               | 136,8              | 34,8                                   |
| 1,1-Диметилциклопентан               | -69,8    | 10,79           | 87,8               | 30,29                                  | Изобутилформиат                    | -95,8    | —               | 98,4               | 33,85                                  |
| 1,1-Диметилциклогексан               | -33,5    | 2,023           | 119,5              | 32,97                                  | Изобутилхлорид [14]                | -131,2   | —               | 68,9               | —                                      |
| <i>цис</i> -1,2-Диметилциклогексан   | -50,0    | 1,645           | 129,7              | 34,23                                  | Изовалериановая кислота            | -29,3    | 7,32            | 176,50             | 43,1                                   |
| <i>транс</i> -1,3-Диметилциклогексан | -90,1    | 9,86            | 123,5              | 38,85                                  | Изокротоновая кислота              | 15,5     | 9,12            | 169                | —                                      |
| <i>цис</i> -1,4-Диметилциклогексан   | -87,4    | 9,307           | 124,3              | 33,76                                  | Изомасляная кислота                | -46,1    | 5,0             | 153,2              | 41,1                                   |
| 1,2-Диметоксибензол                  | 22,7     | 16,0            | 206,1              | —                                      | Изопентан                          | -159,9   | 5,156           | 27,85              | 24,59                                  |
| Диметоксиметан                       | -104,8   | 7,97            | 42,5               | 28,6                                   | Изопрен                            | -145,95  | 4,83            | 34,07              | 25,82                                  |
| 1,4-Диоксан                          | 11,8     | 12,84           | 101,5              | 35,8                                   | Изопропилацетат                    | -73,4    | —               | 88                 | 33,1                                   |
| Дифенил                              | 71,0     | 18,6            | 255,2              | 47,95                                  | Изопропиловый спирт                | -89,5    | 5,37            | 82,4               | 40,48                                  |
| Дифениламин                          | 54,5     | 17,53           | 302                | 55,23                                  | Индан                              | -1,8     | —               | 182,44             | —                                      |
| Дифенилметан                         | 25,2     | 18,4            | 264,3              | —                                      | Иодбензол                          | -31,33   | 9,75            | 188,4              | 40,80                                  |
| Дифениловый эфир                     | 26,9     | 17,22           | 257,9              | 47,74                                  | Иодметан                           | -66,4    | —               | 42,4               | 26,14                                  |
| 1,2-Дифенилэтан                      | 53       | 30,5            | 285                | —                                      | 1-Иодпропан                        | -101,3   | —               | 102,4              | —                                      |
| Дифтордихлорметан (фреон-12)         | -158,2   | 4,14            | -29,8              | 19,61                                  | Иодэтан                            | -108     | —               | 72,3               | 29,8                                   |
| Дифторуксусная кислота               | -1,1     | —               | 134,2              | —                                      | Иприт                              | 13,5     | —               | 215                | —                                      |
| 1,1-Дифтор-1-хлорэтан                | -130,8   | 2,69            | -9,2               | 22,4                                   | $\alpha$ -Камфора [14]             | 178,4    | 6,82            | 209,2              | —                                      |
| Дифторхлорметан (фреон-22)           | -146,5   | 4,12            | -40,8              | 20,22                                  | Каприловая кислота                 | 16,5     | 21,4            | 239,3              | —                                      |
| 1,1-Дифторэтан                       | -117     | —               | -24,7              | 23,8                                   | Каприновая кислота                 | 31,5     | —               | 270                | —                                      |
| 1,2-Дихлорбензол                     | -14      | 12,9            | 180,05             | —                                      | Капроновая кислота                 | -1,5     | 15,1            | 205                | —                                      |
| 1,3-Дихлорбензол                     | -24,76   | 12,6            | 173,0              | —                                      | Карбонил бромистый                 | —        | —               | 60                 | 30,1                                   |
| 1,2-Дихлорбутан [14]                 | -80,4    | —               | 124                | —                                      | Карбонил фтористый                 | -114     | —               | -83,3              | 16,15                                  |
| Дихлорметан                          | -95,1    | 4,6             | 40                 | 28,0                                   | Кетен                              | -134,1   | 7,53            | -41                | 20,25                                  |
| 1,1-Дихлортолуол [14]                | -16,1    | —               | 214,0              | —                                      | Коричная кислота                   | 135      | —               | 300,0              | —                                      |
| Дихлоруксусная кислота               | 10,8     | 7,65            | 194,4              | 42,7                                   | Коричный спирт                     | 34       | —               | 275,5              | —                                      |
| 1,1-Дихлорэтан                       | -96,98   | 7,870           | 57,28              | 28,71                                  | <i>орто</i> -Крезол                | 30,9     | —               | 191,0              | 46,94                                  |
| 1,2-Дихлорэтан                       | -35,36   | 8,837           | 83,47              | 31,45                                  | <i>мета</i> -Крезол                | 11,5     | —               | 202,2              | 49,38                                  |
| 1,1-Дихлорэтилен                     | -122,1   | 6,51            | 37                 | 26,4                                   | <i>пара</i> -Крезол                | 34,8     | —               | 201,9              | 49,53                                  |
| <i>цис</i> -1,2-Дихлорэтилен         | -80,5    | 7,205           | 60,3               | 30,23                                  | $\alpha$ -Кротоновая кислота       | 71,6     | 13,0            | 180,5              | —                                      |
| <i>транс</i> -1,2-Дихлорэтилен       | -50      | 11,98           | 47,5               | 28,88                                  | <i>орто</i> -Ксилол                | -25,18   | 13,60           | 144,41             | 36,82                                  |
| Дихлорэтиловый эфир                  | -46,7    | 8,66            | 178,6              | 45,22                                  | <i>мета</i> -Ксилол                | -47,87   | 11,57           | 139,1              | 36,40                                  |
| Диэтиламин                           | -48,0    | —               | 55,5               | 28,83                                  | <i>пара</i> -Ксилол                | 13,26    | 17,1            | 138,35             | 36,07                                  |
| <i>N, N</i> -Диэтиланилин            | -38,8    | —               | 217,0              | 46,32                                  | Кумол (изопропилбензол)            | -96,04   | —               | 152,39             | —                                      |
| 1,3-Диэтилбензол                     | -83,92   | 11,0            | 181,1              | —                                      | Маргариновая кислота               | 62,5     | 51,09           | 227                | —                                      |
| Диэтилкарбонат [14]                  | -43      | —               | 126                | 31,1                                   | Масляная кислота                   | -5,26    | 11,07           | 163,25             | 42,01                                  |
| Диэтиловый эфир                      | -116,2   | 6,90            | 34,51              | 26,60                                  | Ментол                             | 43       | 12,3            | 216                | 50,42                                  |
| Диэтилоксалат                        | -40,6    | —               | 186,1              | 41,58                                  | Метакриловая кислота               | 16       | —               | 162,5              | —                                      |
| Додекан                              | -9,6     | 36,84           | 216,3              | —                                      | Метан                              | -182,48  | 0,938           | -164               | 8,18                                   |
| 1-Додецен                            | -35,2    | 19,91           | 213,4              | —                                      | Метилакрилат                       | —        | —               | 80,5               | 40,29                                  |
| Додециловая кислота                  | 43,75    | 36,6            | 302,3              | 57,49                                  | Метиламин [5]                      | -93,5    | 0,134           | -6,3               | 25,81                                  |
| Додециловый спирт [14]               | 24,0     | —               | 259,0              | —                                      | 3-Метиланилин                      | -30,4    | 3,89            | 203,35             | 45,61                                  |
| 1-Додецин                            | -19      | —               | 215                | —                                      | Метилацетат                        | -98,0    | —               | 57                 | 31,20                                  |
| Изоамилацетат                        | —        | —               | 143,6              | 37,7                                   | 2-Метил-1-бутен                    | -168,5   | 5,36            | 20                 | —                                      |
| Изоамиловый спирт                    | —        | —               | 132                | 44,60                                  | 3-Метил-1-бутен                    | -133,7   | 7,912           | 38,57              | 25,50                                  |
| Изоамилформиат                       | -93,5    | —               | 123,2              | 35,8                                   | Метил- <i>трет</i> -бутиловый эфир | -108,6   | —               | 55,1               | 28,3                                   |
| Изобутан                             | -159,6   | 5,541           | -11,73             | 21,3                                   | Метилбутират                       | -84,8    | —               | 102,5              | 34,42                                  |
| Изобутилацетат                       | -98,6    | —               | 116,2              | 36,7                                   | Метилгидразин                      | -52,4    | 10,42           | 25,0               | 40,37                                  |
| Изобутилбутират                      | -80,7    | —               | 157,5              | 39,0                                   | 2-Метилгексан                      | -118,27  | 8,87            | 90,0               | 30,66                                  |
| Изобутилен                           | -140,4   | 5,93            | -6,9               | 22,12                                  | 2-Метилгептан                      | -109,0   | 10,25           | 117,6              | 33,6                                   |
|                                      |          |                 |                    |                                        | 2-Метилгептиловый спирт            | -112,0   | —               | 175,4              | —                                      |
|                                      |          |                 |                    |                                        | Метилизобутират [14]               | -84,7    | —               | 92,6               | 33,76                                  |
|                                      |          |                 |                    |                                        | Метилмеркаптан                     | -123     | 5,9             | 5,96               | 24,6                                   |
|                                      |          |                 |                    |                                        | Метилнитрат                        | -83,0    | 8,24            | 64,6               | 32,3                                   |
|                                      |          |                 |                    |                                        | Метиловый спирт                    | -93,9    | 3,17            | 64,96              | 35,27                                  |
|                                      |          |                 |                    |                                        | 2-Метилпентан                      | -153,7   | 6,266           | 60,3               | 27,79                                  |
|                                      |          |                 |                    |                                        | 2-Метил-1-пентен                   | -135,7   | —               | 60,7               | 28,20                                  |
|                                      |          |                 |                    |                                        | 2-Метил-2-пентен                   | -135,1   | —               | 67,3               | 29,0                                   |

| Вещество                        | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ | Вещество                         | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ |
|---------------------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|
| 2-Метил-2-пентило-<br>вый спирт | -103     | —               | 121,1                    | 39,3                                   | Пропиловый спирт                 | -126,5   | 5,20            | 97,4                     | 41,81                                  |
| Метилпропионат                  | -87,5    | —               | 79,8                     | 32,64                                  | Пропилпропионат                  | -75,9    | —               | 122,3                    | 35,6                                   |
| Метилсилан                      | -156,8   | —               | -57,5                    | 18,4                                   | Пропилформиат                    | -92,9    | —               | 81,3                     | 31,93                                  |
| 3-Метилтиофен                   | -69,0    | 40,54           | 115,4                    | 34,25                                  | Пропин                           | -101,5   | —               | -23,2                    | 23,27                                  |
| Метилформиат                    | -99      | 6,7             | 31,5                     | 27,89                                  | Пропионовая кислота              | -20,8    | 7,53            | 141                      | 30,62                                  |
| Метилциклогексан                | -126,6   | 6,75            | 100,9                    | 31,7                                   | Салициловая кислота              | 159,5    | —               | 256,0                    | —                                      |
| Метилциклопентан                | -142,4   | 6,23            | 71,8                     | 29,3                                   | [14]                             |          |                 |                          |                                        |
| 2-Метил-3-этилпентан            | -115,0   | 11,32           | 115,6                    | 32,95                                  | Спиропентан                      | -107,0   | 6,435           | 39,0                     | 33,39                                  |
| Миристиловая кисло-<br>та       | 53,7     | 44,95           | 328                      | 61,5                                   | Стеариновая кислота              | 71       | —               | 374                      | 66,11                                  |
| Мочевина (карбамид)             | 135      | 15,1            | 154 (разл.)              | —                                      | Стирол                           | -30,63   | 10,95           | 145,2                    | —                                      |
| Муравьиная кислота              | 8,4      | 12,68           | 100,7                    | 22,26                                  | Тиобутан                         | -105,9   | 9,76            | 66,7                     | 29,52                                  |
| Нафталин                        | 80,28    | 18,98           | 217,96                   | —                                      | 2-Тиопентан                      | -113,0   | 9,91            | 95,5                     | 32,08                                  |
| 1-Нафтол                        | 96       | 23,47           | 288,0                    | 72,27                                  | 2-Тиопропан                      | -98,39   | 7,99            | —                        | —                                      |
| 2-Нафтол                        | 122      | 22,6            | 295                      | 68,32                                  | Тиофен                           | -38,3    | 5,09            | 84,2                     | 31,47                                  |
| Неопентан                       | -16,55   | 3,256           | 9,50                     | 22,75                                  | Тетрабромметан                   | 90,5     | 3,95            | 189,5                    | 43,1                                   |
| орто-Нитроанилин                | 71,5     | 16,1            | 284,1                    | 63,93                                  | Тетрадекан                       | -5,9     | 45,07           | 253,7                    | —                                      |
| мета-Нитроанилин                | 114,0    | 23,7            | 305,7                    | 65,93                                  | 1, 2, 3, 4-Тетраметил-<br>бензол | -6,25    | 7,046           | 205,0                    | 45,02                                  |
| пара-Нитроанилин                | 149      | 22,2            | 313,7                    | 77,4                                   | 1, 2, 4, 5-Тетраметил-<br>бензол | 79,24    | 21,0            | 196,8                    | 45,52                                  |
| Нитробензол                     | 5,85     | 12,12           | 211,03                   | —                                      | 2, 2, 3, 3-Тетраметил-<br>бутан  | -100,7   | 7,54            | 106,5                    | 31,6                                   |
| Нитроглицерин                   | 13       | 21,9            | 256 (взр.)               | 34                                     | Тетраметилсилан                  | -99,0    | 6,90            | 26,6                     | 24,2                                   |
| Нитрометан                      | -28,55   | 9,7             | 101,2                    | 50,17                                  | Тетранитрометан                  | 14,2     | —               | 126                      | 38,5                                   |
| 3-Нитротолуол                   | 15       | 13,7            | 231,9                    | —                                      | Тетрафторэтилен                  | -142,5   | 7,71            | -76,3                    | 16,82                                  |
| 2-Нитрофенол                    | 45,5     | 17,4            | 216                      | —                                      | Тетрахлорметан                   | -22,99   | 2,5             | 76,54                    | 30,0                                   |
| Нонан                           | -51      | 15,47           | 150,8                    | 37,76                                  | 1, 1, 1, 2-Тетрахлор-<br>этан    | -70,21   | —               | 130,5                    | 36,8                                   |
| 1-Нонен                         | -81,37   | —               | 146,87                   | —                                      | 1, 1, 2, 2-Тетрахлор-<br>этан    | -36      | —               | 146,2                    | 38,7                                   |
| 1-Нониловый спирт               | -5,5     | —               | 213,5                    | —                                      | Тетрахлорэтилен                  | -19,0    | 10,5            | 121,0                    | 34,7                                   |
| 1-Нонин                         | -50      | —               | 150,8                    | 53,1                                   | Тетрафторметан                   | -183,7   | 0,70            | -129                     | 12,33                                  |
| Октан                           | -56,79   | 20,74           | 125,66                   | 34,57                                  | Тетразилсвинце                   | -136,2   | 8,79            | 195 (разл.)              | —                                      |
| 1-Октен                         | -101,73  | 15,31           | 121,3                    | —                                      | Тетразилсилан                    | -83,8    | 13,0            | 153,0                    | 39,7                                   |
| 1-Октиловый спирт               | 16,7     | —               | 194,45                   | 51,5                                   | Толуол                           | -95,01   | 6,62            | 110,62                   | 33,47                                  |
| 2-Октиловый спирт               | -31,6    | —               | 180,8                    | —                                      | 1, 2, 2-Трибромбутан             | —        | —               | 213,8                    | —                                      |
| 1-Октин                         | -79,3    | —               | 125,5                    | —                                      | [14]                             |          |                 |                          |                                        |
| Олеиновая кислота               | 16,3     | —               | 369                      | 67,15                                  | Трибромметан                     | 8,3      | 11,08           | 149,5                    | —                                      |
| Пальмитиновая кис-<br>лота      | 63       | 54,89           | 360                      | 63,14                                  | 1, 2, 3-Трибромпропан            | 16,9     | —               | 222,2                    | —                                      |
| Паральдегид                     | -12,6    | 13,8            | 128                      | —                                      | 1, 1, 2-Трибромэтан              | -29,3    | —               | 188,93                   | —                                      |
| Пентадекан                      | 10,0     | 34,59           | 270,6                    | —                                      | Тридекан                         | -5,4     | 25,50           | 235,4                    | —                                      |
| Пентадекановая кис-<br>лота     | 52,5     | 43,1            | 158                      | —                                      | Тридекановая кислота             | 45       | 33,6            | 299,0                    | —                                      |
| 1,4-Пентадиен                   | -148,28  | 6,14            | 25,97                    | 26,0                                   | Триметиламин                     | -117,3   | —               | 2,8                      | 24,3                                   |
| Пентаи                          | -129,7   | 8,41            | 36,07                    | 25,77                                  | 1, 2, 4-Триметилбензол           | -43,91   | 12,34           | 16,35                    | 39,25                                  |
| 1-Пентантион                    | -75,7    | 17,49           | 126,6                    | 37,02                                  | 2, 2, 3-Триметилбутан            | -24,19   | 22,01           | 80,88                    | 28,95                                  |
| Пентафторхлорэтан               | -106     | 1,878           | -38                      | 19,41                                  | Триметилоксид                    | -97      | 6,49            | 46                       | —                                      |
| Пентахлорэтан                   | -29,0    | —               | 162                      | 40,6                                   | 2, 2, 3-Триметилпентан           | -112,3   | 8,63            | 109,8                    | 32,2                                   |
| 1-Пентен                        | -138     | 5,81            | 30,0                     | 25,20                                  | Триметилсилан                    | -135,9   | —               | 6,7                      | 24,4                                   |
| цис-2-Пентен                    | -151,4   | 7,11            | 36,9                     | —                                      | 1, 2, 4-Трихлорбензол            | 17,05    | 15,48           | 213,0                    | —                                      |
| транс-2-Пентен                  | -136     | 8,39            | 36,3                     | —                                      | 1, 1, 1-Трихлорпропан            | -77,7    | —               | 108,2                    | —                                      |
| 1-Пентин                        | -90,0    | —               | 40,2                     | —                                      | Трихлоруксусная кис-<br>лота     | 59,1     | 5,90            | 195,0                    | 56,2                                   |
| Перлягоновая кислота            | 15       | 20,3            | 254                      | —                                      | 1, 1, 1-Трихлорэтан              | -30,41   | 1,88            | 74,1                     | —                                      |
| $\alpha$ -Пиколин               | -66,7    | 9,82            | 129,6                    | 37,77                                  | 1, 1, 2-Трихлорэтан              | -30,5    | 11,38           | 113,77                   | 36,8                                   |
| Пикриновая кислота              | 122,5    | 19,5            | 320                      | 87,9                                   | Трихлорэтилен                    | -73      | —               | 87                       | 32,13                                  |
| Пиперидин                       | -9,0     | —               | 106,5                    | 32,3                                   | Трифторбромметан                 | -143,2   | —               | -59                      | 22,7                                   |
| Пиридин                         | -41,7    | 8,28            | 115,2                    | 35,11                                  | Трифторметан (фре-<br>он-23)     | -160     | —               | -82,2                    | 18,4                                   |
| Пирролидин                      | -59      | 8,58            | 86,6                     | 33,01                                  | Трифторуксусная<br>кислота       | -15,3    | —               | 72,4                     | 34,7                                   |
| Пропадиен (аллен)               | -136     | —               | -34,5                    | 20,92                                  | Трифторхлорметан                 | -181     | —               | -81,1                    | 14,63                                  |
| Пропан                          | -189,7   | 2,52            | -42,1                    | 18,77                                  | (фреон-13)                       | -111,3   | 6,19            | -47,31                   | 19,8                                   |
| 1, 3-Пропандиол                 | -85,1    | —               | 213,5                    | 44,33                                  |                                  |          |                 |                          |                                        |
| Пропен (пропылен)               | -185,2   | 3,00            | -47,4                    | 18,42                                  |                                  |          |                 |                          |                                        |
| Пропиламин                      | -83,0    | —               | 47,8                     | 29,05                                  |                                  |          |                 |                          |                                        |
| Пропилацетат                    | -95      | —               | 101,8                    | 34,74                                  |                                  |          |                 |                          |                                        |
| Пропилбутират                   | -97,2    | —               | 142,7                    | 37,2                                   |                                  |          |                 |                          |                                        |

| Вещество                           | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ | Вещество            | $t_{пл}$ | $\Delta H_{пл}$ | $t_{кип},$<br>$t_{субл}$ | $\Delta H_{кип},$<br>$\Delta H_{субл}$ |
|------------------------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|---------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------------------------------------|
| Уксусная кислота                   | 16,64    | 11,73           | 117,8                    | 23,7                                   | Циклогексен         | -103,5   | 3,293           | 83                       | —                                      |
| Ундекан                            | -25,59   | 25,18           | 195,9                    | —                                      | Циклогептан         | -12      | 1,882           | 118,5                    | —                                      |
| $\alpha$ -Ундекановая кис-<br>лота | 28,6     | 25,1            | 280                      | —                                      | Циклононан          | 9,7      | 19,3            | 178,4                    | 40,5                                   |
| Уретан                             | 48,5     | 15,2            | 187                      | —                                      | Циклооктан          | 14,3     | 2,410           | 149                      | —                                      |
| Фенатрен                           | 101      | 18,62           | 340                      | —                                      | Циклопентан         | -93,9    | 0,609           | 49,3                     | 27,2                                   |
| Фенилгидразин                      | 19,8     | 16,4            | 248                      | 54                                     | Циклопентанол       | -19      | 1,54            | 140,8                    | —                                      |
| Фенилуксусная кис-<br>лота         | 76,7     | 17,7            | 266,5                    | —                                      | Циклопентен         | -135,1   | 3,363           | 44,2                     | —                                      |
| Фенол                              | 40,8     | 11,6            | 181,8                    | 47,30                                  | Циклопропан         | -127,5   | 5,443           | -32,7                    | 20,5                                   |
| Формальдегид                       | -118     | —               | -19,3                    | 23,3                                   | орто-Цимол          | -71,54   | —               | 178,15                   | —                                      |
| Формамид                           | 2,6      | 6,7             | 210 (разл.)              | —                                      | Щавелевая кислота   | субл.    | 70,92           | 157                      | 90,8                                   |
| Фосген                             | -127,8   | 5,69            | 7,56                     | 24,40                                  | Эйкозановая кислота | 76,2     | 15,0            | —                        | —                                      |
| Фторбензол                         | -41,2    | 11,30           | 85,1                     | 31,20                                  | Энантовая кислота   | -7,5     | —               | 223                      | —                                      |
| Фторбутан                          | -121,4   | —               | 25,1                     | 26,05                                  | Этан                | -183,3   | 2,857           | -88,63                   | 14,70                                  |
| Фтордихлорметан [5]                | -135     | —               | 9                        | 24,0                                   | Этандиаль           | 15       | —               | 50,4                     | 38                                     |
| Фторметан                          | -141,8   | —               | -78,4                    | 17,56                                  | Этен (этилен)       | -169,15  | 3,351           | -103,71                  | 13,54                                  |
| Фтортрихлорметан<br>(фреон-11)     | -111     | 6,893           | 23,8                     | 24,9                                   | Этилена окись       | -112,5   | 5,173           | 10,5                     | 25,53                                  |
| Фторхлорметан                      | —        | —               | -9,1                     | 23,4                                   | Этиленгликоль       | -11,5    | 11,6            | 198                      | 57,03                                  |
| Фтороксиметан                      | -138     | —               | -42                      | 22,2                                   | Этилендиамин        | 8        | 19,3            | 117,4                    | 38,9                                   |
| Фторэтан                           | -143,2   | —               | -37,7                    | 21,07                                  | Этилакрилат         | -71,2    | —               | 99,8                     | —                                      |
| Фторэтилен                         | -160,5   | —               | 72,2                     | 17,1                                   | Этиламин            | -81      | —               | 16,6                     | 27,30                                  |
| 2-Фторэтиловый спирт               | -26,45   | —               | 103,5                    | 43,9                                   | N-Этиланилин        | -63,6    | —               | 204,72                   | —                                      |
| Фуран                              | -85,6    | 3,80            | 31,4                     | 27,04                                  | Этилацетат          | -83,578  | 10,98           | 77,06                    | 32,26                                  |
| Фурфуриловый спирт                 | -14,6    | —               | 171                      | —                                      | Этилбензол          | -94,975  | 9,16            | 136,19                   | 35,98                                  |
| Фурфурол                           | -38,7    | —               | 161,5                    | —                                      | Этилбутират         | -100,8   | —               | 121,55                   | 36,7                                   |
| Хинолин                            | -15,2    | 10,79           | 236,6                    | 47,35                                  | Этилвиниловый эфир  | -115,8   | —               | 37,5                     | —                                      |
| мета-Хлоранилин                    | -10,4    | 11,63           | 230,6                    | —                                      | 3-Этилгексан        | —        | —               | 118,53                   | 33,60                                  |
| Хлорацетилен                       | -126     | —               | -30                      | 22,5                                   | Этилизообутират     | -88,2    | —               | 110,1                    | 34,43                                  |
| Хлорбензол                         | -45,58   | 9,556           | 131,69                   | 35,66                                  | Этилизовалерат [14] | -99,3    | —               | 135,4                    | —                                      |
| 1-Хлор-1-бромбензол<br>[14]        | 16,6     | —               | 82,7                     | 33,1                                   | Этилмеркаптан       | -147,9   | 4,975           | 35,0                     | 26,78                                  |
| 1-Хлорбутан                        | -123,1   | —               | 78,44                    | 30,9                                   | Этилметиловый эфир  | —        | —               | 7,5                      | 24,73                                  |
| Хлорметан                          | -97,73   | 6,43            | -24,2                    | 21,63                                  | 1-Этилнафталин      | -13,9    | 16,3            | 258,7 (разл.)            | —                                      |
| Хлороформ                          | -63,5    | 9,5             | 61,1                     | 29,67                                  | Этилнитрат          | -94,6    | 8,527           | 87,7                     | 33,9                                   |
| 1-Хлорпентан                       | -99      | —               | 107,8                    | —                                      | Этилнитрил          | -44,9    | 8,91            | 81,5                     | 32,75                                  |
| 1-Хлорпропан                       | -122,8   | 5,544           | 46,6                     | 27,6                                   | Этиловый спирт      | -113,3   | 5,02            | 78,5                     | 38,74                                  |
| Хлоруксусная кисло-<br>та [5]      | 61,2     | 15,85           | 189,35                   | 54                                     | 3-Этилпентан        | -118,6   | 9,456           | 93,5                     | 30,95                                  |
| 4-Хлорфенол                        | 43,5     | 15,1            | 219,8                    | —                                      | Этилпропиловый эфир | —        | —               | 61,4                     | 28,90                                  |
| Хлорэтан                           | -136,4   | 4,45            | 12,27                    | 24,65                                  | Этилпропионат       | -73,9    | 12,6            | 99,1                     | 34,42                                  |
| Хлорэтилен                         | -153,8   | 4,74            | -13,7                    | 20,8                                   | Этилсилан           | -179,7   | —               | -13,7                    | 22,3                                   |
| 2-Хлор-1-этиловый<br>спирт         | -67,5    | —               | 128                      | 41,4                                   | 2-Этилтолуол        | -80,83   | 10,63           | 165,15                   | 38,87                                  |
| Циклобутан                         | -50      | 1,088           | 12                       | 24,19                                  | 4-Этилфенол         | 47       | —               | 219,0                    | —                                      |
| Циклогексан                        | 6,55     | 2,665           | 80,74                    | 30,8                                   | Этилформат          | -80,5    | 9,2             | 54,5                     | 30,31                                  |
| Циклогексанол                      | 25,2     | 1,70            | 161,4                    | 42,4                                   | Этилхлорацетат      | -26,0    | —               | 141,3                    | 41,4                                   |
|                                    |          |                 |                          |                                        | Этилцианид          | -91,8    | 6,07            | 97,10                    | 31,0                                   |
|                                    |          |                 |                          |                                        | Этилциклогексан     | -111,3   | 8,333           | 131,8                    | 34,69                                  |
|                                    |          |                 |                          |                                        | Этилциклопентан     | -138,4   | 6,896           | 103,5                    | 32,17                                  |
|                                    |          |                 |                          |                                        | Этин (ацетилен)     | субл.    | —               | -84                      | 21,3                                   |
|                                    |          |                 |                          |                                        | Янтарный ангидрид   | 119,6    | —               | 261,0                    | —                                      |
|                                    |          |                 |                          |                                        | [14]                |          |                 |                          |                                        |

Таблица 12.4. Температура плавления полупроводниковых, оптических и высокотемпературных соединений, °C [30—35]. (См. также табл. 12.2)

| Вещество                                  | $t_{пл}$ | Вещество            | $t_{пл}$ | Вещество                        | $t_{пл}$ | Вещество                                          | $t_{пл}$ |
|-------------------------------------------|----------|---------------------|----------|---------------------------------|----------|---------------------------------------------------|----------|
| Полупроводниковые и оптические соединения |          |                     |          |                                 |          |                                                   |          |
| AgFeSe <sub>2</sub>                       | 574      | AgGaTe <sub>2</sub> | 717      | AlAs                            | 1597     | As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>                   | 360      |
|                                           |          | AgInS <sub>2</sub>  | 850      | AlP                             | 1500     | As <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>                   | 362      |
| AgFeTe <sub>2</sub>                       | 387      | AgInSe <sub>2</sub> | 777      | AlSb                            | 1054     | BiAs                                              | 1900     |
|                                           |          | AgInTe <sub>2</sub> | 677      | Al <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> | 950      | Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub> | 1430     |
| AgGaSe <sub>2</sub>                       | 847      | AgSbSe <sub>2</sub> | 637      | Al <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> | 895      | BaSrNbO <sub>6</sub>                              | 1480     |
|                                           |          | AgSbTe <sub>2</sub> | 557      | AsSb                            | 807      | BiSe                                              | 607      |

| Вещество          | $t_{пл}$ | Вещество                              | $t_{пл}$ | Вещество            | $t_{пл}$ | Вещество            | $t_{пл}$ |
|-------------------|----------|---------------------------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| $Bi_2Se_3$        | 707      | InN                                   | 927      | $Nb_2C$             | 2927     | $CaC_2$             | 2300     |
| $CaMoO_4$         | 1430     | InP                                   | 1054     | $NbB_4$             | 2900     | $Th_2S$             | 2300     |
| $Ca(NbO_3)_2$     | 1560     | InSb                                  | 525      | $\alpha-SiC$        | 2800     | $Th_4S_7$           | 2300     |
| $Ca_5(PO_4)_3$    | 1705     | InSe                                  | 660      | $TiB_2$             | 2790     | $YC_2$              | 2300     |
| $Ca_2Pb$          | 110      | InTe                                  | 696      | $HfO_2$             | 2777     | $YB_6$              | 2300     |
| $Ca_2Si$          | 910      | $KH_2PO_4$                            | 255      | $W_2B$              | 2770     | $W_2B_5$            | 2300     |
| $Ca_3(VO_4)_2$    | 1430     | KSb                                   | 332      | $W_2C$              | 2730     | NbB                 | 2280     |
| $CdAs_2$          | 621      | $K_3Sb$                               | 812      | $UO_2$              | 2730     | $UC_2$              | 2250     |
| $CdGeAs_2$        | 397      | $LaTe_2$                              | 727      | WC                  | 2720     | VB                  | 2250     |
| $CdIn_2Se_4$      | 917      | $LiNbO_3$                             | 1250     | $ZrO_2$             | 2700     | $ScB_2$             | 2250     |
| $CdIn_2Te_4$      | 787      | $LiTaO_3$                             | 1650     | $ZrB_{12}$          | 2680     | $Mo_3B_2$           | 2250     |
| $Cd_3P_2$         | 740      | $Mg_2Ge$                              | 1115     | $ThO_2 \cdot ZrO_2$ | 2680     | $UB_{12}$           | 2235     |
| $CdSb$            | 456      | $Mg_2Pb$                              | 650      | YN                  | 2670     | $SrB_6$             | 2235     |
| $Cd_4Sb_3$        | 460      | $Mg_2Sn$                              | 778      | $ThC_2$             | 2656     | $CaB_6$             | 2230     |
| $CdSiP_2$         | <1200    | $NH_4H_2PO_4$                         | 190      | UN                  | 2650     | BaB <sub>6</sub>    | 2230     |
| $CdSnAs_2$        | 322      | NaSb                                  | 192      | ScN                 | 2650     | BP                  | 2227     |
| $CeGaSe_3$        | 1125     | $Nd_2S_3$                             | 1737     | ThN                 | 2630     | $Ba_3N_2$           | 2220     |
| $Ce_2S_3$         | 1617     | $PbMoO_4$                             | 1065     | CaO                 | 2600     | $ThB_4$             | 2210     |
| $Ce_2Se_3$        | 1162     | $Pr_2S_3$                             | 1827     | BeO                 | 2550     | BaS                 | 2205     |
| $Cu_3AsS_4$       | 655      | SmS                                   | 902      | $SmB_6$             | 2540     | $Be_3N_5$           | 2205     |
| $CuFeSe_2$        | 574      | $SnSe_2$                              | 657      | $NdB_6$             | 2540     | $Be_3N_2$           | 2200     |
| $CuFeTe_2$        | 467      | $SrMoO_4$                             | 1065     | $LaB_6$             | 2530     | $CaO \cdot ZrO_2$   | 2200     |
| $CuGaSe_2$        | 767      | SnTe                                  | 790      | $Ta_4Si$            | 2510     | $Nd_2S_3$           | 2200     |
| $CuGaTe_2$        | 697      | $Y_2Te_3$                             | 1252     | $Ta_5Si_3$          | 2500     | $CrB_2$             | 2200     |
| $Cu_2GeS_3$       | 932      | $YVO_4$                               | 1940     | $CeO_2 \cdot ZrO_2$ | 2500     | $Ti_4B$             | 2200     |
| $CuInSe_2$        | 987      | $ZnAs_2$                              | 768      | MgO                 | 2500     | $TiSi_2$            | 2200     |
| $CuInTe_2$        | 697      | $ZnGeAs_2$                            | 602      | UB <sub>4</sub>     | 2495     | CeB <sub>6</sub>    | 2190     |
| $Cu_2S$           | 1130     | $ZnIn_2Se_4$                          | 977      | SrO                 | 2460     | WSi <sub>2</sub>    | 2165     |
| $Cu_3SbSe$        | 555      | $ZnIn_2Te_4$                          | 802      | CeO                 | 2450     | ZrSi                | 2150     |
| $CuSbTe_2$        | 527      | ZnSb                                  | 546      | $Cr_2O_3$           | 2440     | $ThB_6$             | 2150     |
| $Cu_2SnS_3$       | 837      | <i>Высокотемпературные соединения</i> |          | TaB                 | 2430     | $Mo_2B$             | 2140     |
| $Cu_2SnSe_3$      | 687      |                                       |          | TaS                 | 2425     | NdS                 | 2140     |
| $\beta-Cu_2Te$    | 1111     | HfC                                   | 3890     | ThS                 | 2425     | $Ti_5Si_3$          | 2120     |
| $CuTiSe_2$        | 407      | TaC                                   | 3880     | $B_4C$              | 2425     | $Th_3N_4$           | 2100     |
| $Er_2Se_3$        | 1520     | ZrC                                   | 3530     | $Nb_2N$             | 2420     | $MoB_2$             | 2100     |
| GaN               | 1227     | NbC                                   | 3480     | $ZrO_2 \cdot SiO_2$ | 2420     | GdB <sub>6</sub>    | 2100     |
| GaP               | 1350     | $Ta_2C$                               | 3400     | $Y_2O_3$            | 2410     | $La_2S_3$           | 2100     |
| GaSb              | 712      | HfB <sub>2</sub>                      | 3250     | VB <sub>2</sub>     | 2400     | VO                  | 2077     |
| $Ga_2Se_3$        | 1020     | TiN                                   | 3205     | AlN                 | 2400     | $V_3B_2$            | 2070     |
| $Ga_2Te_3$        | 790      | TiC                                   | 3147     | $U_2C$              | 2400     | $Ce_3S_4$           | 2050     |
| $Gd_3P_2$         | 700      | TaB <sub>2</sub>                      | 3100     | $\alpha-WB$         | 2400     | CrB                 | 2050     |
| $Gd_2Se_3$        | 450      | TaN                                   | 3087     | UB <sub>2</sub>     | 2385     | $MoSi_2$            | 2030     |
| $Gd_2Te_3$        | 1147     | NbB <sub>2</sub>                      | 3000     | VN                  | 2360     | $Al_3O_3$           | 2030     |
| GeSe <sub>2</sub> | 740      | BN                                    | 3000     | MoB                 | 2350     | TiO                 | 2020     |
| GeTe              | 725      | HfN                                   | 2982     | UC                  | 2350     | $Al_2O_3 \cdot BaO$ | 2000     |
| $HgIn_2Se_4$      | 827      | ZrN                                   | 2982     | $Be_2C$             | 2325     | $BeO \cdot ZrO_2$   | 2000     |
| $HgIn_2Te_4$      | 707      | TiB <sub>2</sub>                      | 2980     | $La_2O_3$           | 2310     | $Al_2O_3 \cdot BeO$ | 2000     |
| HgSe              | 765      | ThO <sub>2</sub>                      | 2956     | $BeB_6$             | 2300     | $Al_2O_3 \cdot MgO$ | 1930     |
| HgTe              | 655      |                                       |          |                     |          |                     |          |
| InAs              | 943      |                                       |          |                     |          |                     |          |

Таблица 12.5. Температура плавления (солидус)  $t_c$ , °C, сталей и промышленных сплавов. Выделены значения ликвидуса, °C

| Марка | $t_c$ | Марка | $t_c$ | Марка | $t_c$ | Марка | $t_c$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

## Стали [24, 25, 26]

|                |      |               |      |          |      |         |      |
|----------------|------|---------------|------|----------|------|---------|------|
| Углеродистые   | 1535 | X18H9, X23H18 | 1410 | 0X18H10  | 1410 | X23H13  | 1440 |
| X13, X25T, X28 | 1500 | X18H9T        | 1500 | X20H14C2 | 1400 | 4X10C2M | 1480 |
| X28Л, X34Л     | 1350 | X18H10T       | 1400 |          |      |         |      |

| Марка                  | $t_c$ | Марка      | $t_c$ | Марка           | $t_c$ | Марка           | $t_c$ |
|------------------------|-------|------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| <b>Бронзы [27, 28]</b> |       |            |       |                 |       |                 |       |
| Бр. А5                 | 1056  | Кадмневая  | 1040  | Бр. ОС10-10     | 925   | Бр. ОПС5-5-5    | 955   |
| Бр. А7                 | 1040  | Бр. КМц3-1 | 970   | Бр. ОС12-7      | 930   | Бр. ОПС6-6-3    | 967   |
| Бр. А10                | 1040  | Бр. КН1-3  | 1050  | Бр. ОСН10-2-3   | 1000  | Бр. ОПС8-4-3    | 1015  |
| Бр. АЖ9-4              | 1040  | Бр. КС3-4  | 1020  | Бр. ОФ4-0,25    | 1060  | Бр. ОПСН3-7-5-1 | 990   |
| Бр. АЖМц10-3-1,5       | 1045  | Бр. КЦ4-4  | 1000  | Бр. ОЦ4-3       | 1045  | Бр. С30         | 975   |
| Бр. АЖН10-4-4          | 1084  | Бр. Мг 0,3 | 1076  | Бр. ОЦ 8-4      | 854   | Серебряная      | 1082  |
| Бр. АЖН11-6-6          | 1135  | Бр. Мц 5   | 1007  | Бр. ОЦ 10-2     | 1015  | Бр. СН60-2,5    | 885   |
| Бр. АЖС7-1,5-1,5       | 1020  | Бр. О10    | 1020  | Бр. ОПС3-12-5   | 1000  | Бр. СуН7-2      | 950   |
| Бр. АМц 9-2            | 1060  | Бр. ОС5-25 | 899   | Бр. ОПС 3,5-6-5 | 980   | Бр. Х0, 5       | 1073  |
| Бр. Б2                 | 864   | Бр. ОС8-12 | 940   | Бр. ОПС4-4-2,5  | 887   | Сплав ХОТ       | 1075  |
| Бр. Б2,5               | 930   | Бр. ОС10-5 | 980   | Бр. ОПС4-4-17   | 920   | Бр. Цр0,4       | 965   |

**Латуни [24, 27, 28]**

|     |      |                        |      |                |     |          |     |
|-----|------|------------------------|------|----------------|-----|----------|-----|
| Л59 | 885  | ЛА 67-2,5              | 995  | ЛМц 58-2       | 865 | ЛО65-1—2 | 920 |
| Л62 | 898  | ЛА 77-2                | 930  | ЛМцА 57-3-1    | 920 | ЛО70-1   | 890 |
| Л63 | 900  | ЛА 85-0,5              | 1020 | ЛМцЖ 52-4-1    | 940 | ЛО74-3   | 885 |
| Л66 | 905  | ЛАЖ 60-1-1             | 904  | ЛМц 55-3-Г     | 930 | ЛО90-1   | 995 |
| Л68 | 909  | ЛАЖМц 66-6-3-2         | 899  | ЛМцС 58-2-2    | 900 | ЛС59-1   | 900 |
| Л70 | 915  | ЛАН 59-3-2             | 892  | ЛМцОС 58-2-2-2 | 900 | ЛС60-1   | 900 |
| Л75 | 980  | ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 | 940  | ЛН 56-3        | 890 | ЛС63-3   | 885 |
| Л80 | 965  | ЛЖМц 59-1-1            | 885  | ЛН 65-5        | 960 | ЛС64-2   | 910 |
| Л85 | 990  | ЛК80-3                 | 900  | ЛО 59-1        | 885 | ЛС74-3   | 965 |
| Л90 | 1025 | ЛКС65-1,5-3            | 870  | ЛО 60-1        | 885 | —        | —   |
| Л96 | 1055 | ЛКС80-3-3              | 900  | ЛО 62-1        | 885 | —        | —   |

**Медно-никелевые сплавы [24, 27, 28]**

|                 |      |                |      |                 |      |                |      |
|-----------------|------|----------------|------|-----------------|------|----------------|------|
| Алюмель         | 1430 | Манганин       | 960  | Нейзильбер      | 965  | МН95-5         | 1086 |
| МНцАК2-2-1      |      | МНМц 3-12      |      | МНЦС 16-29-1,8  |      | МНА13-3        | 1120 |
| Константан МНМц | 1260 | Мельхиор МНЖМц | 1170 | Нихром Х20Н80   | 1390 | МНЦС 17—18—1,8 | 1120 |
| 40-1,5          |      | 30-1-1         |      |                 |      |                |      |
| Копель МНМц     | 1220 | Мельхиор МН19  | 1130 | Ферронихром     | 1230 | НК 0,2         | 1384 |
| 43-0,5          |      |                |      | Х15Н60          |      | НМ8            | 1190 |
| Куниаль А       | 1183 | Монель НМЖМц   | 1370 | Хромель Т НХ9,5 | 1435 | НМ 56,6        | 1290 |
| МНА 13-13       |      | 28-2,5-1,5     |      | Хромель К НХ9   | 1435 | НММц 3—12      | 960  |
| Куниаль Б       | 1140 | Нейзильбер     | 1080 | МН0,6 (ТП)      | 1084 | НМц 2,5        | 1440 |
| МНА6-1,5        |      | МНЦ 15-20      |      | МН5             | 1120 | НМц 5          | 1370 |
|                 |      |                |      | МН16 (ТБ)       | 1120 |                |      |

**Алюминиевые сплавы [24]**

|             |     |       |     |        |     |      |     |
|-------------|-----|-------|-----|--------|-----|------|-----|
| АВ (Авиаль) | 543 | АЛ10В | 488 | АМг 7  | 550 | В-95 | 477 |
| АК2         | 509 | АМг   | 627 | АМц    | 643 | Д1   | 513 |
| АК8         | 638 | АМг3  | 568 | АН-2,5 | 640 | Д16  | 502 |
| АЛ1         | 535 | АМг5  | 638 | АСМ    | 657 | Д18П | 510 |

**Магниеые сплавы [27]**

|        |     |     |     |           |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|
| ВМ65-1 | 516 | МЛ4 | 400 | МЛ9, МЛ10 | 550 | МА2 | 565 |
| МЛ1    | 505 | МЛ5 | 430 | МЛ11      | 593 | МА3 | 510 |
| МЛ2    | 645 | МЛ6 | 440 | МЛ15      | 539 | МА5 | 482 |
| МЛ3    | 561 | МЛ7 | 505 | МА1       | 645 | МА8 | 645 |

**Цинковые сплавы [28]**

|        |     |         |     |          |     |         |     |
|--------|-----|---------|-----|----------|-----|---------|-----|
| ЦА15   | 443 | ЦАМ 4-1 | 390 | ЦАМ 10—2 | 419 | ЦМ4     | 445 |
| ЦАМ2-4 | 470 | ЦАМ 4-3 | 410 | ЦАМ 10—5 | 395 | ЦОС 3—3 | 411 |
| ЦАМ2-5 | 450 | ЦАМ 8-2 | 405 | ЦМ1      | 422 |         |     |

| Марка | $t_c$ | Марка | $t_c$ | Марка | $t_c$ | Марка | $t_c$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

## Типографские сплавы [27, 28]

|              |     |            |     |         |     |    |     |
|--------------|-----|------------|-----|---------|-----|----|-----|
| Лн1, Ст2     | 240 | Мн, ШЗ, Нт | 255 | Ш2      | 270 | Ш1 | 330 |
| МЛн1, Мп1, У | 245 | МСМ1, П2   | 260 | Гс, МШЗ | 300 | К  | 340 |

## П р и т о и [28, 29]

|             |     |              |     |          |     |        |     |
|-------------|-----|--------------|-----|----------|-----|--------|-----|
| ПМЦ 36      | 800 | ПОССу 4-6    | 244 | ПСр 1    | 225 | ПСр3Кд | 295 |
| ПМЦ 48      | 850 | ПОССу 5-1    | 275 | ПСр 1,5  | 265 | ПСр10  | 822 |
| ПМЦ 54      | 876 | ПОССу 10-2   | 268 | ПСр 2    | 225 | ПСр12М | 793 |
| ПОС40÷ПОС90 | 183 | ПОССу 40-2   | 185 | ПСр 2,5  | 300 | ПСр44  | 650 |
| ПОС10       | 268 | ПОССу 18-0,5 | 183 | ПСр 2,5С | 304 | ПСр65  | 695 |
| ПОСК 50-18  | 142 | ПОССу 95-5   | 234 | ПСр 3    | 314 | ПСр72  | 779 |

## Баббиты [28]

|     |     |      |     |     |     |     |     |
|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Б6  | 416 | Б91  | 223 | Б93 | 304 | БН  | 400 |
| Б83 | 370 | Б93А | 260 | БК  | 440 | БС6 | 280 |

Таблица 12.6. Температура плавления (солидус)  $t_c$  двухкомпонентных сплавов, °С [36]

| Компонент |    | Содержание компонента В, % |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|----|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| А         | В  | 10                         | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
| Ag        | Sn | 870                        | 750  | 630  | 550  | 495  | 450  | 420  | 375  | 300  |
| Ag        | Zn | 850                        | 755  | 705  | 690  | 660  | 630  | 610  | 570  | 505  |
| Al        | Ag | 625                        | 615  | 600  | 590  | 580  | 575  | 570  | 650  | 750  |
| Al        | Au | 675                        | 740  | 800  | 855  | 915  | 970  | 1025 | 1055 | —    |
| Al        | Cu | 630                        | 600  | 560  | 540  | 580  | 610  | 755  | 930  | 1055 |
| Al        | Fe | 860                        | 1015 | 1110 | 1145 | 1145 | 1220 | 1315 | 1425 | 1500 |
| Al        | Sb | 750                        | 840  | 925  | 945  | 950  | 970  | 1000 | 1040 | 1010 |
| Al        | Sn | 645                        | 635  | 625  | 620  | 605  | 590  | 570  | 560  | 540  |
| Al        | Zn | 640                        | 620  | 600  | 580  | 560  | 530  | 510  | 475  | 425  |
| Au        | Ag | 1062                       | 1061 | 1058 | 1054 | 1049 | 1039 | 1025 | 1006 | 982  |
| Au        | Cu | 910                        | 890  | 895  | 905  | 925  | 975  | 1000 | 1025 | 1060 |
| Au        | Pt | 1125                       | 1190 | 1250 | 1320 | 1380 | 1455 | 1530 | 1610 | 1685 |
| Cd        | Ag | 420                        | 520  | 610  | 700  | 760  | 805  | 850  | 895  | 910  |
| Cd        | Tl | 300                        | 285  | 270  | 262  | 258  | 245  | 230  | 210  | 235  |
| Cd        | Zn | 280                        | 270  | 295  | 313  | 327  | 340  | 355  | 370  | 390  |
| Cu        | Ag | 1035                       | 990  | 945  | 910  | 870  | 830  | 788  | 814  | 875  |
| Cu        | Ni | 1180                       | 1240 | 1290 | 1320 | 1335 | 1380 | 1410 | 1430 | 1440 |
| Cu        | Sn | 1055                       | 890  | 755  | 725  | 680  | 630  | 580  | 530  | 440  |
| Cu        | Zn | 1040                       | 955  | 930  | 900  | 880  | 820  | 780  | 700  | 580  |
| K         | TI | 133                        | 165  | 188  | 205  | 215  | 220  | 240  | 280  | 305  |
| Na        | Bi | 425                        | 520  | 590  | 645  | 690  | 720  | 730  | 715  | 570  |
| Na        | Cd | 125                        | 185  | 245  | 285  | 325  | 330  | 340  | 360  | 390  |
| Ni        | Sn | 1380                       | 1290 | 1200 | 1235 | 1290 | 1305 | 1230 | 1060 | 800  |
| Pb        | Ag | 460                        | 545  | 590  | 620  | 650  | 705  | 775  | 840  | 905  |
| Pb        | Cu | 870                        | 920  | 925  | 945  | 950  | 955  | 985  | 1005 | 1020 |
| Pb        | Na | 360                        | 420  | 400  | 370  | 330  | 290  | 250  | 200  | 130  |
| Pb        | Sb | 250                        | 275  | 330  | 395  | 440  | 490  | 525  | 560  | 600  |
| Pb        | Sn | 295                        | 276  | 262  | 240  | 220  | 190  | 185  | 200  | 216  |
| Pb        | TI | 710                        | 790  | 880  | 917  | 760  | 600  | 480  | 410  | 425  |
| Sb        | Ag | 595                        | 570  | 545  | 520  | 500  | 505  | 545  | 680  | 850  |
| Sb        | Bi | 610                        | 590  | 575  | 555  | 540  | 520  | 470  | 405  | 330  |
| Sb        | Sn | 600                        | 570  | 525  | 480  | 430  | 395  | 350  | 310  | 255  |
| Sb        | Zn | 555                        | 510  | 540  | 570  | 565  | 540  | 525  | 510  | 470  |



Таблица 12.7. Температура плавления (солидус)  $t_c$  легкоплавких сплавов, °C [24, 37—39]

| Сплав                              | $t_c$ | Сплав                  | $t_c$ |
|------------------------------------|-------|------------------------|-------|
| Hg97,2 Na2,8*1                     | —48,2 | Bi50 Pb25 Sn25         | 93    |
| Cs94,5 Na5,5*1                     | —30   | Bi50 Pb31,2 Sn18,8*5   | 94    |
| Cs93 Na7*1                         | —28   | Bi50 Sn25 Cd25         | 95    |
| K78 Na22*1                         | —11,4 | Bi52,5 Pb32 Sn12,5     | 96    |
| K80 Na20                           | —10   | Bi47 Pb35,3 Sn17,7     | 98    |
| Rb91,8 Na8,2*1                     | —4,5  | Bi40 Pb20 Sn40         | 100   |
| K70 Na30                           | —3,5  | Bi50 Pb40 Sn10         | 100   |
| K60 Na40                           | 5     | Bi50 Pb28 Sn22*6       | 100   |
| K50 Na50                           | 11    | Bi54,4 Pb25,8 Sn19,8*  | 101   |
| K90 Na10                           | 17,5  | Bi48 Pb28,5 Sn14,5 Hg9 | 105   |
| Na56 K44*1                         | 19    | Bi42,1 Pb42,1 Sn15,8   | 108   |
| Na85,2 Hg14,8*1                    | 21,4  | Bi40 Pb40 Sn20*7       | 113   |
| Na60 K40                           | 26    | Bi36,5 Pb36,5 Sn27     | 117   |
| Na70 K30                           | 41    | Bi33,4 Pb33,3 Sn33,3   | 123   |
| Na50 Hg50                          | 45    | Bi55,5 Pb44,5*1        | 124   |
| Bi47,7 In19,1 Sn8,3 Sb5,3 Pb22,6*1 | 47    | Bi56,5 Sn43,5*1        | 125   |
| Bi36 Hg30 Pb 28Cd6                 | 48    | Bi27,2 Pb44,5 Sn33,3   | 127   |
| Bi42 Pb32 Hg20 Cd6                 | 50    | Bi43 Pb43 Sn13         | 128   |
| Hg70 Na30                          | 55    | Bi56 Sn40 Zn4*1        | 130   |
| Bi49,4 In21 Pb18 Sn11,6*1          | 57    | Bi28,5 Pb43 Sn28,5     | 132   |
| Na80 K20                           | 58    | K90 Ti10               | 133   |
| Na60 Hg40                          | 60    | Hg70 K30               | 135   |
| Bi53,5 Sn19 Pb17 Hg10,5            | 60    | Bi57 Sn43*1            | 138   |
| Na99 Ti1*1                         | 64    | Bi57 Ti43*1            | 139   |
| Bi50,1 Pb24,9 Sn14,6 Cd10,8*2      | 65,5  | Cd18,2 Pb30,6 Sn51,2   | 142   |
| Bi50,4 Pb25,1 Sn14,3 Cd10,2*2      | 67,5  | Pb42 Sn37              | 143   |
| Bi50 Pb25 Sn12,5 Cd12,5*2          | 68    | Bi60 Cd40*1            | 144   |
| Bi50,1 Pb22,6 Sn13,3 Cd10*3        | 68    | Bi50 Pb50              | 145   |
| Na70 Hg30                          | 70    | Bi19 Pb38 Sn43         | 148   |
| Bi49,5 Pb27,27 Sn13,13 Cd10,1*1    | 70    | Bi25 Pb50 Sn25         | 149   |
| Bi38,4 Pb30,8 Sn15,4 Cd15,4        | 71    | Bi18,1 Pb36,2 Sn45,7   | 151   |
| Bi33,7 In65,3*1                    | 72    | Bi16 Pb36 Sn48         | 155   |
| Bi27,5 Cd34,5 Pb27,5 Sn10,5        | 75    | Bi13,7 Pb44,8 Sn41,5*1 | 160   |
| Bi50 Pb34,5 Sn9,3 Cd6,2            | 77    | Bi10,5 Pb42 Sn47,5     | 160   |
| Na90 K10                           | 77    | Bi13,3 Pb46 Sn40,1     | 165   |
| Bi58 In17 Sn25*1                   | 79    | K80 Ti20               | 165   |
| Bi35,3 Cd9,5 Pb35,1 Sn20,1         | 80    | Bi12,8 Pb49 Sn38,2     | 172   |
| Na80 Hg20                          | 80    | Pb32 Sn68              | 177   |
| Na96,7 Au3,3*1                     | 80    | Cd32 Sn68*1            | 177   |
| Na90 Hg10                          | 90    | Na70 Hg30              | 181   |
| Na50 Hg50                          | 90    | Sn62 Pb38*1            | 183   |
| Bi55,2 Pb33,3 Ti11,5*1             | 91    | Bi44,2 Pb9,8 Ti48*1    | 186   |
| Bi51,6 Cd8,1 Pb40,3                | 91    | Bi47,5 Ti52,5*1        | 188   |
| Bi50 Pb30 Sn20*4                   | 92    | Bi76,5 Ti23,5*1        | 198   |

\*1 Эвтектический сплав.

\*2 Сплав Вуда.

\*3 Сплав Липовица.

\*4 Сплав Лихтенберга.

\*5 Сплав Ньютона.

\*6 Сплав Роуза.

\*7 Висмутовый сплав.

Таблица 12.8. Температура размягчения  $t_p$ , стекл, °С [40]

| Стекло        | $t_p$ | Стекло                     | $t_p$ |
|---------------|-------|----------------------------|-------|
| Кварцевое:    |       | N51-A                      | 574   |
| КВ, КУ, КВР   | 1160  | Multal                     | 670   |
| КИ            | 1220  | Sial                       | 590   |
| I             | 1300  | Волоконное бесщелочное     | 830   |
| II            | 1100  | Волоконное натриевое       | 710   |
| Лабораторное  |       | Листовое оконное           | 600   |
| N23           | 580   | Медицинское НС-1           | 630   |
| N29           | 565   | Медицинское АБ-1           | 590   |
| Ц32           | 590   | Пеностекло                 | <600  |
| N846          | 582   | Пеностекло кремнеземистое  | 1100  |
| Термостойкое: | 620   | Сортовое (посудное)        | 560   |
| N13           | 680   | Ситаллы СТЛ                | 980   |
| T16           | 680   | Ситаллы СТМ, СТБ           | 930   |
| T28           | 645   | Стекло для труб 13 в       | 725   |
| Щ23           | 710   | Стекло для труб ситалловое | 1100  |
| Щ26           | 730   | Хрустальное (свинцовое)    | 530   |
| Пирекс        | 565   | Шлакоситаллы               | 950   |
| Симакс        | 570   |                            |       |
| Uninost       | 530   |                            |       |

Таблица 12.9. Температура размягчения  $t_p$  пластмасс и полимеров, °С [29, 41—44]

| Пластмасса                | $t_p$ | Пластмасса                             | $t_p$ |
|---------------------------|-------|----------------------------------------|-------|
| Аман                      | 180   | Поликарбонаты                          | 220   |
| Аминопласты               | 100   | Полиметилметакрилат                    | 120   |
| Асбостеклолит             | 130   | Полипропилен                           | 152   |
| Асбостеклотекстолит       | 130   | Полистирол                             | 90    |
| Винипласт                 | 180   | Полиуретан                             | 85    |
| Гетинакс                  | 150   | Полиформальдегид                       | 177   |
| Дифлон                    | 150   | Полиэтилен                             | 90    |
| Древесно-слоистый пластик | 150   | Полиэтилентерефталат                   | 130   |
| Делан                     | 150   | Полиэфир                               | 115   |
| Капролон                  | 190   | Премиксы                               | 130   |
| Капрон                    | 215   | Стеклотекстолит                        | 250   |
| Карбамидные смолы         | 75    | Текстолит                              | 140   |
| Лавсан                    | 155   | Терилен                                | 264   |
| Нейлон                    | 60    | Фенопласты                             | 135   |
| Ниплон                    | 330   | Фенопласты ударопрочные                | 140   |
| Оргстекло СОЛ             | 90    | Фторопласт-3                           | 125   |
| Оргстекло 2-55            | 133   | Фторопласт-3М                          | 150   |
| Пенопласт изофан          | 210   | Фторопласт-4 (тефлон)                  | 260   |
| Пенопласты                | 140   | Фторопласт-4М                          | 220   |
| Пенопласты эпоксидные     | 170   | Фенилон                                | 150   |
| Пенополиуретаны           | 230   | Целлофан                               | 60    |
| Пентапласты               | 160   | Целлулонд                              | 40    |
| Полиакрилаты              | 65    | Шеллак                                 | 80    |
| Полиамиды                 | 190   | Эпоксидные смолы                       | 150   |
| Полиарилаты               | 190   | Эпоксикремнийорганический материал КЭП | 220   |
| Поливинилфторид           | 196   | Этролы                                 | 70    |
| Поливинилхлорид           | 60    | Энант                                  | 225   |
| Полиимиды                 | 250   |                                        |       |

Таблица 12.10. Температура кристаллизации (застывания) топлива, масел и гидравлических жидкостей, °С.  
Вещества расположены в порядке возрастания  $t_{пл}$  [44, 22, 38]

| Вещество                        | $t$  | Вещество                         | $t$ |
|---------------------------------|------|----------------------------------|-----|
| <b>Топливо*</b>                 |      | <b>Масло смазочное*2</b>         |     |
| Бензин Б-70                     | —60  | МП-609                           | —80 |
| Керосин                         | —38  | МП-601                           | —70 |
| Реактивное Т8                   | —55  | МПВ                              | —60 |
| Дизельное А                     | —55  | МАС-19Н                          | —49 |
| Дизельное ЗС                    | —45  | И-12А                            | —30 |
| Дизельное З                     | —35  | И-5А (велосит)                   | —25 |
| Дизельное Л                     | —10  | И-8А (швейное)                   | —20 |
| Мазут:                          |      | И-20А, И-40А                     | —15 |
| топочный                        |      | И-70А, И-100А                    | —10 |
| Флотский                        | —6   | Вакуумное ВМ-1                   | —12 |
| Мазут 40                        | 10   |                                  |     |
| Мазут 100, МП                   | 25   |                                  |     |
| <b>Масло трансформаторное*2</b> |      | <b>Нигролы*2</b>                 |     |
| ФМ-5                            | —110 | Зимний                           | —20 |
| ФС-5                            | —100 | ТС-14,5                          | —15 |
| ФС-56                           | —90  | Летний                           | —5  |
| АТМ-65                          | —70  |                                  |     |
| Гексол, ПМС-50                  | —60  | <b>Гидравлические жидкости*2</b> |     |
| Т-750, Т-1500                   | —60  | АМГ-10, МГЕ-10                   | —70 |
| ТК, ТКп                         | —53  | РМ, МГЗ                          | —60 |
| С-220                           | —45  | ЭШ                               | —50 |
| ГХБД                            | —30  | АУ, Р, АУП                       | —45 |
| ТХБ                             | —21  | МГ-30                            | —35 |
| Совтол                          | —16  | ИС-12, ОМТИ                      | —30 |
| Совол                           | —7   | ИС-50                            | —20 |
|                                 | 5    | МС-20                            | —18 |
| <b>Масло моторное*2</b>         |      | ИС-20                            | —15 |
| МТ-14П                          | —43  |                                  |     |
| МТ-16П                          | —25  |                                  |     |
| МС-20П                          | —18  |                                  |     |
| Моторное Т                      | 0    |                                  |     |

\*1 Температура кристаллизации.

\*2 Температура застывания.

Таблица 12.11. Температура плавления  $t_{пл}$  и кипения  $t_{кип}$  хладонов, антифризов и теплоносителей, °С (хладоны приведены в номенклатурном порядке, остальные вещества — в порядке возрастания  $t_{пл}$ ) [37, 38, 45]

| Марка или состав, % | $t_{пл}$ | $t_{кип}$ | Марка или состав, %         | $t_{пл}$ | $t_{кип}$ |
|---------------------|----------|-----------|-----------------------------|----------|-----------|
| <b>Хладоны</b>      |          |           | <b>Антифризы</b>            |          |           |
| R11                 | —111,0   | 23,65     | R116                        | —100,6   | —78,21    |
| R12                 | —155,9   | —29,74    | R142                        | —138,0   | —9,20     |
| R12B1               | —80,0    | —3,83     | R143a                       | —111,3   | —47,58    |
| R13                 | —180,0   | —81,59    | R152                        | —117     | 24,54     |
| R13B1               | —143,2   | —57,77    | RC318                       | —41,4    | —5,97     |
| R14                 | —184,0   | —128,02   |                             |          |           |
| R21                 | —135,0   | 8,37      | <b>Теплоносители</b>        |          |           |
| R22                 | —160,0   | —40,81    | ТОСОЛ-А65                   | —65      | 115       |
| R23                 | —155,0   | —82,14    | ТОСОЛ-А40                   | —40      | 108       |
| R30                 | —96,7    | 40,10     | ТОСОЛ-А                     | —35      | 170       |
| R40                 | —97,8    | —23,86    |                             |          |           |
| R113                | —35,0    | 46,82     | Силикон МАИ                 | —100     | 191       |
| R113B2              | —72,9    | 94,57     | Этиленгликоль 67; вода 33   | —73      | —         |
| R114                | —93,9    | 3,63      | CaCl 29,9; вода 60,1        | —55      | —         |
| R114B2              | —110,5   | 47,15     | Пропиленгликоль 60; вода 40 | —50      | —         |
| R115                | —106,0   | —38,97    |                             |          |           |

| Марка или состав, %                                                  | $t_{пл}$ | $t_{кип}$ | Марка или состав, %                                                               | $t_{пл}$ | $t_{кип}$ |
|----------------------------------------------------------------------|----------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|
| МИПД                                                                 | —47      | 290       | Дифенилметан                                                                      | 25,4     | 264,3     |
| ТКС                                                                  | —36      | 440       | Дифениловый эфир                                                                  | 27,0     | 258,5     |
| ТКОС                                                                 | —33      | 457       | <i>орто</i> -Терфенил 65,8; <i>мета</i> -терфенил 33,5; <i>пара</i> -терфенил 0,7 | 28,9     | 346       |
| ДТМ                                                                  | —30      | 296       | <i>орто</i> -Терфенил 66,3; <i>мета</i> -терфенил 33,7                            | 29,3     | 345,5     |
| Дифенилбутан                                                         | —25      | 295,3     |                                                                                   |          |           |
| $\text{TiCl}_4$                                                      | —23      | 153,9     | $\text{TiBr}_4$                                                                   | 39       | 230       |
| $\text{NaCl}$ 23,1; вода 76,9                                        | —21,2    | —         | <i>орто</i> -Терфенил                                                             | 56,25    | 337,5     |
| ДКМ                                                                  | —22      | 335       | $\text{AlCl}_3$ 22,5; $\text{AlBr}_3$ 77,5                                        | 67       | 200       |
| Глицерин                                                             | —17,9    | 290       | Дифенил                                                                           | 69,5     | 255,6     |
| Дифенилэтан                                                          | —17,9    | 272,6     |                                                                                   |          |           |
| Этиленгликоль                                                        | —15,6    | 197,3     | $\text{AlCl}_3$ 80,7; $\text{NaCl}$ 9,7;                                          | 70       | 254       |
| $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{K}_2\text{O}$                         | —11      | 784       | $\text{KCl}$ 9,6                                                                  | 80,2     | 281,8     |
| Дифенил 30,9; <i>орто</i> -терфенил 47,5; <i>мета</i> -терфенил 21,6 | 10,5     | 297,5     | Нафталин                                                                          |          |           |
| $\text{Na}_56$ К44                                                   | 19       | 825       | <i>мета</i> -Терфенил                                                             | 87,45    | 379       |
| Дифенил 40,2; <i>орто</i> -терфенил 59,2; <i>пара</i> -терфенил      | 22,7     | 287       | $\text{Bi}$ 55,5; $\text{Pb}$ 43,5                                                | 125      | 1670      |
| Дифенил 50,5; <i>орто</i> -терфенил 59,5                             | 23       | 286,5     | <i>пара</i> -Терфенил                                                             | 212,7    | 384       |

### 12.3. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Многие технические материалы в твердом состоянии являются смесями, твердыми растворами или аморфными веществами; процесс их плавления отличается от плавления чистых веществ.

Плавление сплавов и твердых растворов обычно происходит в некотором интервале температур — от нижней температуры (солидус) до верхней (ликвидус); внутри этого интервала вещество находится в гетерогенном состоянии. Исключением являются эвтектические сплавы, у которых солидус и ликвидус совпадают. В табл. 12.4—12.7 приведена температура плавления (как правило, солидус) технических материалов — полупроводниковых, оптических и высокотемпературных веществ, сталей, промышленных и специальных сплавов.

Плавление (и затвердевание) веществ, имеющих в твердом состоянии аморфную структуру, не имеет выраженной температуры перехода, оно совершается постепенно и характеризуется температурой размягчения (и соответственно застывания). В табл. 12.8, 12.9 приведена температура размягчения аморфных твердых материалов этого типа — стекол и полимерных материалов, а в табл. 12.10 — температура застывания некоторых технических жидкостей.

В табл. 12.11 приведены температуры плавления и кипения жидкостей, используемых в качестве теплоносителей и хладонов.

Процессы плавления, кипения и сублимации зависят от давления в соответствии с уравнением Клапейрона—Клаузиуса

$$dT/dP = T(\Delta V/\Delta H),$$

где  $T$ ,  $\Delta H$  — температура и теплота перехода;  $\Delta V$  — изменение объема вещества при переходе;  $P$  — давление.

Температура кипения и сублимации всегда возрастает с увеличением давления. Зависимость  $T_{кип}(P)$  и  $T_{субл}(P)$  называют кривой упругости пара; соответствующие данные приведены в гл. 11.

Температура плавления также, как правило, возрастает с увеличением давления. Отклонения наблюдаются для отдельных веществ на ограниченных интервалах давления и объясняются несоответствием плотности упаковки атомов в жидком состоянии и структуры кристаллического состояния. Зависимости  $T_{пл}(P)$  для элементов и некоторых неорганических и органических соединений приведены в табл. 12.12, 12.13. Там же приведены значения производной  $dT_{пл}/dP$ , с помощью которых можно вычислить значение  $T_{пл}$  при сравнительно малых отклонениях от нормального давления (до 100—1000 МПа).

Таблица 12.12. Температура плавления элементов  $t_{пл}$ , °С, в зависимости от давления и производная  $dt_{пл}/dP$ ,  $10^{-2}$  °С/МПа, при нормальном давлении [6,15]

| Элемент   | $dt_{пл}/dP$ | Давление, МПа |         |          |         |           |             |              | Дополнительная литература |
|-----------|--------------|---------------|---------|----------|---------|-----------|-------------|--------------|---------------------------|
|           |              | 10            | 50      | 100      | 500     | 1000      | 3000        | 5000         |                           |
| Азот      | 21,95        | —208          | —200    | —190,9   | —149,2  | —         | —           | —            | [16, 17]                  |
| Активный  | 19,40        | 1052          | 1060    | 1069     | 1147    | 1244      | 1632        | 2020         | —                         |
| Алюминий  | 6,41         | 661           | 663     | 667      | 692     | 724       | 852         | 981          | [17]                      |
| Америций  | 2,50         | 1175          | 1176    | 1177     | 1185    | 1200      | 1245        | —            | —                         |
| Аргон     | 24,89        | —187          | —177    | —166,8   | —95,8   | —         | —           | —            | [16]                      |
| Астат     | 55,80        | 307           | 330     | 358      | —       | —         | —           | —            | —                         |
| Барий     | 4,30         | 727           | 729     | 731      | 748     | 770       | 715         | 590          | —                         |
|           |              | 500           | (6 ГПа) | 525      | (7 ГПа) | 380       | (7,5 ГПа)   | —            | —                         |
| Бериллий  | 5,00         | 1287          | 1289    | 1292     | 1312    | 1337      | 1437        | 1537         | —                         |
| Бром      | ~25          | —             | —       | —        | 80      | 170       | —           | —            | —                         |
| Ванадий   | 15,7         | 1918          | 1925    | 1933     | 1995    | 2074      | 2388        | 2702         | —                         |
| Висмут    | —3,57        | 271           | 269     | 267,5    | 252     | 228       | 250         | 425          | [16, 17]                  |
|           |              | 180           | (2 ГПа) | 500      | (6 ГПа) | —         | —           | —            | —                         |
| Водород   | 29,60        | —256          | —247    | —239     | —198    | —160      | —           | —            | [18, 19]                  |
| Вольфрам  | 7,80         | 3347          | 3350    | 3354     | 3385    | 3424      | 3580        | 3736         | [20]                      |
| Гадолиний | 5,7          | 1312          | 1315    | 1318     | 1340    | 1369      | 1450        | 1480 (4 ГПа) | —                         |
| Галлий    | —2,11        | 30            | 29      | 28       | 19      | 8         | 50          | 100          | [17]                      |
| Гафний    | 17,3         | 2232          | 2238    | 2247     | 2316    | 2403      | 2749        | 3095         | —                         |
| Гелий     | 25,7         | —269,8        | —264    | —258,4   | —246    | (0,3 ГПа) | —           | —            | [17, 21]                  |
| Гелий-3   | 18,2         | —270,7        | —263    | —258,4   | —246,2  | (0,3 ГПа) | —           | —            | [22]                      |
| Германий  | —3,80        | 937           | 936     | 934      | 922     | 902       | 826         | 750          | —                         |
| Гольмий   | 14,30        | 1475          | 1481    | 1488     | 1545    | 1617      | 1903        | 2189         | —                         |
| Дейтерий  | 24,50        | —252          | —244    | —236     | —197,9  | —157,7    | —           | —            | [19]                      |
| Европий   | 12,80        | 823           | 828     | 835      | 886     | 950       | 1000        | 980          | —                         |
|           |              |               |         |          |         |           | 960 (7 ГПа) | —            | —                         |
| Железо    | 3,00         | 1538          | 1539    | 1541     | 1553    | 1568      | 1628        | 1645         | [17]                      |
| Золото    | 6,20         | 1064          | 1067    | 1070     | 1095    | 1126      | 1224        | 1336         | —                         |
| Индий     | 5,22         | 157           | 159     | 162      | 182     | 205       | 287         | 380          | [17]                      |
|           |              |               |         |          |         |           | 540 (9 ГПа) | —            | —                         |
| Иод       | 21,7         | 116           | 124     | 135      | 222     | 331       | 575         | 670          | —                         |
|           |              |               |         |          |         |           | (4,5 ГПа)   | —            | —                         |
| Иридий    | 6,2          | 2447          | 2450    | 2453     | 2478    | 2509      | 2633        | 2757         | —                         |
| Иттербий  | 17,0         | 816           | 823     | 831      | 902     | 990       | 1215        | 1230 (4 ГПа) | —                         |
| Иттрий    | 16,5         | 1529          | 1536    | 1544     | 1610    | 1693      | 2023        | 2353         | —                         |
| Кадмий    | 5,3          | 321           | 324     | 326      | 347     | 374       | 480         | 586          | —                         |
| Калий     | 17,71        | 64            | 71      | 78,5     | 127     | 167       | 240         | 275          | [16, 17]                  |
| Кальций   | 14,90        | 843           | 849     | 857      | 916     | 985       | 1090        | 1200 (4 ГПа) | —                         |
|           | 800          | (10 ГПа)      | 710     | (12 ГПа) | —       | —         | —           | —            | —                         |
| Кислород  | 11,42        | —218          | —213    | —208     | —190    | (0,3 ГПа) | —           | —            | [17]                      |
| Кобальт   | 3,50         | 1492          | 1494    | 1495     | 1509    | 1527      | 1597        | 1667         | —                         |
| Кремний   | —5,81        | 1419          | 1417    | 1414     | 1391    | 1330      | 1230        | 1110         | [17]                      |
| Криптон   | 30,13        | —154          | —143    | —129     | —40     | 48        | —           | —            | —                         |
| Ксенон    | 38,90        | —             | —93     | —75      | 43      | (0,3 ГПа) | —           | —            | [17]                      |
| Лантан    | 2,50         | 920           | 921     | 922      | 932     | 945       | 995         | 1045         | —                         |
| Литий     | 3,41         | 181           | 182     | 184      | 194     | 204       | 228         | 242          | [17]                      |
| Лютеций   | 15,90        | 1664          | 1671    | 1679     | 1742    | 1822      | 2140        | 2458         | —                         |
| Магний    | 7,50         | 651           | 654     | 657      | 687     | 725       | 875         | 1025         | [17]                      |
| Марганец  | 3,30         | 1245          | 1246    | 1248     | 1261    | 1278      | 1344        | 1410         | —                         |
| Медь      | 4,69         | 1084          | 1085    | 1088     | 1107    | 1130      | 1215        | 1310         | [17]                      |
| Молибден  | 0,96         | 2611          | 2611    | 2612     | 2616    | 2620      | 2640        | 2659         | [20]                      |
| Мышьяк    | 5,7          | 818           | 819     | 823      | 846     | 860       | 920         | 940          | [17]                      |
| Натрий    | 8,77         | 99            | 102     | 105,9    | 136     | 175       | 245         | 285          | [16, 17]                  |
| Неодим    | 2,60         | 1024          | 1025    | 1026     | 1037    | 1050      | 1080        | 1080         | —                         |
|           |              | 1075          | (6 ГПа) | —        | —       | —         | —           | —            | —                         |
| Неон      | 13,16        | —247          | —242    | —235     | —216    | (0,3 ГПа) | —           | —            | [17]                      |
| Нептуний  | 2,30         | 637           | 638     | 639      | 648     | 670       | 720         | 760 (4 ГПа)  | —                         |
| Никель    | 3,70         | 1455          | 1457    | 1459     | 1473    | 1492      | 1566        | 1640         | —                         |
| Ниобий    | 16,2         | 2470          | 2477    | 2485     | 2550    | 2631      | 2955        | 3279         | —                         |
| Олово     | 2,61         | 232           | 233     | 234      | 245     | 256       | 299         | 420          | [17]                      |
| Осмий     | 6,50         | 3045          | 3048    | 3051     | 3077    | 3110      | 3240        | 3370         | —                         |
| Палладий  | 6,40         | 1554          | 1557    | 1560     | 1586    | 1618      | 1746        | 1874         | —                         |

| Элемент          | $dt_{пл}/dP$  | Давление, МПа    |      |         |       |           |      |              | Дополнительная литература |
|------------------|---------------|------------------|------|---------|-------|-----------|------|--------------|---------------------------|
|                  |               | 10               | 50   | 100     | 500   | 1000      | 3000 | 5000         |                           |
| Платина          | 6,20          | 1749             | 1752 | 1755    | 1780  | 1811      | 1935 | 2015         | [20]                      |
| Плутоний         | —7,9          | 638              | 635  | 631     | 599   | 560       | 500  | 515          | —                         |
| Празеодим        | —             | 934              | —    | —       | —     | 940       | 935  | 920          | —                         |
| Прометий         | 31,30         | 1093             | 1105 | 1121    | 1246  | 1403      | 2029 | 2655         | —                         |
| Протактиний      | 18,40         | 1574             | 1581 | 1590    | 1664  | 1756      | 2124 | 2492         | —                         |
| Радий            | 21,30         | 842              | 850  | 861     | 946   | 1053      | 1479 | —            | —                         |
| Радон            | 34,60         | —68              | —54  | —37     | —     | —         | —    | —            | —                         |
| Рений            | 3,20          | 3177             | 3178 | 3180    | 3193  | 3209      | 3273 | 3337         | [20]                      |
| Родий            | 5,90          | 1963             | 1966 | 1969    | 1992  | 2022      | 2140 | 2258         | —                         |
| Ртуть            | 5,21          | —38              | —36  | —34     | —13   | 12,06     | 100  | 190          | [16, 17]                  |
| Рубидий          | 21,11         | 41               | 49   | 57,9    | 115   | 164       | 235  | 280          | [16, 17]                  |
| Рутений          | 6,10          | 2250             | 2253 | 2256    | 2280  | 2311      | 2433 | 2555         | —                         |
| Самарий          | 6,0           | 1072             | 1075 | 1078    | 1102  | 1132      | 1180 | 1200         | —                         |
| Свинец           | 7,73          | 328              | 331  | 335     | 364   | 398       | 516  | 612          | [17]                      |
| Селен            | 20,76         | 224              | 233  | 243     | 317   | 390       | 605  | 680          | [17]                      |
| Сера (ромб.)     | 31,30         | —                | 135  | 148     | 226   | 270       | —    | (5,5 ГПа)    | [17, 18]                  |
| Сера (моноклин.) | 33,14         | 117              | 130  | 143     | —     | 280       | 415  | 560          | [17]                      |
| Серебро          | 4,90          | 961              | 963  | 966     | 985   | 1010      | 1108 | 1206         | —                         |
| Скандий          | 15,10         | 1542             | 1548 | 1556    | 1616  | 1692      | 1994 | 2296         | —                         |
| Стронций         | 16,50         | 769              | 776  | 784     | 850   | 933       | 1130 | 1160 (4 ГПа) | —                         |
| Сурьма           | —0,58         | 630              | 630  | 630     | 628   | 624       | 610  | 589          | [17]                      |
| Таллий           | 6,53          | 304              | 306  | 310     | 336   | 368       | 489  | —            | [17]                      |
| Тантал           | 5,40          | 2976             | 2979 | 2981    | 3003  | 3030      | 3138 | 3246         | [20]                      |
| Теллур           | 4,50          | 450              | 452  | 454     | —     | 460       | 450  | 510          | —                         |
| Гербий           | 7,40          | 1357             | 1360 | 1363    | 1393  | 1450      | 1500 | (2,5 ГПа)    | —                         |
| Технеций         | 5,50          | 2200             | 2203 | 2205    | 2227  | 2255      | 2365 | 2475         | —                         |
| Титан            | 15,40         | 1609             | 1616 | 1623    | 1685  | 1762      | 2070 | 2378         | —                         |
| Торий            | 18,60         | 1752             | 1759 | 1768    | —     | —         | —    | —            | —                         |
| Тритий           | 22,12         | —250             | —243 | —235    | —213  | (0,3 ГПа) | —    | —            | [17]                      |
| Углерод          | 19,60         | 3764             | 3772 | 3781    | 3860  | 3958      | 4350 | 4742         | [20]                      |
|                  | 4200          | (7,5 ГПа)        | 3710 | (8 ГПа) | —     | —         | —    | —            | —                         |
| Уран             | 18,10<br>1150 | 1136<br>(7 ГПа)  | 1143 | 1152    | —     | 1150      | 1170 | 1160         | —                         |
| Фосфор           | 29,92         | 47               | 59   | 72,7    | 171,6 | 950       | 1030 | (2 ГПа)      | [17]                      |
| Хром             | 15,90         | 1878             | 1885 | 1893    | 1956  | —         | —    | —            | —                         |
| Цезий            | 25,93<br>100  | 32<br>(4 ГПа)    | 42   | 52      | 98,5  | 160       | 190  | 170          | [17, 23]                  |
| Церий            | —5,0<br>750   | 798<br>(7,5 ГПа) | 797  | 794     | 774   | 750       | 670  | 700          | —                         |
| Цинк             | 4,81          | 420              | 422  | 424     | 443   | 466       | 547  | 619          | [17]                      |
| Цирконий         | 16,30         | 1880             | 1887 | 1895    | 1960  | 2042      | 2368 | 2694         | —                         |

Таблица 12.13. Температура плавления индивидуальных соединений в зависимости от давления  $t_{пл}$ , °C, и производная  $dt_{пл}/dP$ ,  $10^{-2}$  °C/МПа, при нормальном давлении [17]

| Соединение                     | $dt_{пл}/dP$ | Давление, МПа     |       |                 |               |                  |      |
|--------------------------------|--------------|-------------------|-------|-----------------|---------------|------------------|------|
|                                |              | 10                | 50    | 100             | 500           | 1000             | 3000 |
| Неорганические соединения      |              |                   |       |                 |               |                  |      |
| Алюминия антимонид             | —6,90        | 1059              | 1056  | 1053            | 1025          | 991              | 853  |
| Аммиак                         | 8,82         | —77               | —74   | —70             | —56 (0,3 ГПа) | —                | —    |
| Вода [6]                       | —7,68        | —0,8              | —3,84 | —8,8            | —7,5          | 26               | 135  |
|                                |              | —22,0 (214,3 МПа) |       | —17 (357,3 МПа) |               | 0,16 (646,4 МПа) |      |
| Вода тяжелая, D <sub>2</sub> O | —7,78        | 3                 | 0     | —5              | —11 (0,3 ГПа) | —                | —    |
| Вольфрама карбид [20]          | 0,0          | 2850              | 2850  | 2850            | 2850          | 2850             | 2850 |
| Галлия антимонид               | —5,0         | 699               | 697   | 695             | 675           | 650              | 550  |
| Галлия арсенид                 | —3,4         | 1138              | 1136  | 1134            | 1121          | 1104             | 1036 |
| Индия антимонид                | —10,0        | 1024              | 1020  | 1015            | 975           | 925              | 403  |
|                                | 449 (5 ГПа)  |                   |       |                 |               |                  |      |
| Индия арсенид                  | —4,29        | 939               | 938   | 936             | 918           | 897              | 811  |
| Индия фосфид                   | —2,91        | 1060              | 1058  | 1057            | 1045          | 1031             | 973  |
| Калия тетрасиликат             | —6,02        | 764               | 762   | 759             | —             | —                | —    |
| Кадмия теллурид                | —20,0        | 1043              | 1035  | 1025            | 945           | 845              | —    |
| Кремния тетрахлорид [16]       | 31,25        | —65               | —53   | —38             | 67,7          | 183,8            | —    |
| Лития хлорид                   | 24,22        | 607               | 617   | 629             | 715           | 810              | —    |
| Меди хлорид                    | —1,16        | 430               | 429   | 429             | 424           | 417              | 381  |
| Натрия бромид                  | 28,66        | 744               | 755   | 769             | 868           | 973              | —    |
| Натрия иодид                   | 32,81        | 658               | 671   | 687             | 798           | 914              | 1245 |
| Натрия фторид                  | 16,08        | 993               | 1000  | 1007            | 1063          | 1120             | —    |
| Натрия хлорид                  | 23,81        | 803               | 812   | 824             | 910           | 1004             | —    |
| Ортофосфорная кислота          | 8,13         | 43                | 46    | 50              | —             | —                | —    |
| Рубидия хлорид                 | 25,01        | 720               | 729   | 741             | 815           | 1128             | 1426 |
| Серебро азотнокислое           | 9,09         | 213               | 216   | 239             | 257           | 303              | —    |
| Синильная кислота              | 23,28        | —12               | —3    | 7               | 40 (300 МПа)  | —                | —    |
| Углерода двуокись [16]         | 20,82        | —55               | —47   | —5              | 21,4          | 75,4             | 93,5 |
| Углерода дисульфид [16]        | 13,06        | —110              | —105  | —74             | —52           | 0                | 170  |
| Углерода тетрахлорид [16]      | 40,50        | —19               | —3    | 15              | 128           | 192,1            | —    |
| Цезия хлорид                   | 48,29        | —                 | —     | 707             | 870           | 1039             | —    |
| Органические соединения        |              |                   |       |                 |               |                  |      |
| трет-Амиловый спирт            | 22,02        | —6                | 2     | 3               | —             | —                | —    |
| Анетол                         | 21,42        | 25                | 33    | 43              | 77 (300 МПа)  | —                | —    |
| Анилин [16]                    | 21,31        | —4                | 4     | 13,1            | 81            | 143,2            | —    |
| Ацетамид [16]                  | 14,20        | 83                | 88    | 93,1            | 128           | 166              | —    |
| Ацетонитрил                    | 21,20        | —42               | —33   | —24             | 44            | 112              | —    |
| Ацетофенон                     | 25,05        | 22                | 32    | 42              | 78 (300 МПа)  | —                | —    |
| Бензиловый спирт               | 15,38        | —14               | —8    | 0               | —             | —                | —    |
| Бензойный ангидрид             | 26,43        | 46                | 56    | 69              | —             | —                | —    |
| Бензол [16]                    | 29,79        | 9                 | 20    | 32,5            | 117           | 190,5            | —    |
| Бензонитрил                    | 20,40        | —11               | —3    | 7               | 86            | 180              | —    |
| Бензофенон [16]                | 28,93        | 51                | 62    | 74,6            | 163           | 248              | —    |
| Бетол                          | 37,15        | 99                | 112   | 126             | 166 (300 МПа) | —                | —    |
| Бромбензол [16]                | 20,50        | —29               | —21   | —12,1           | 50            | 107,6            | —    |
| 1-Бромнафталин                 | 27,52        | 9                 | 20    | 34              | —             | —                | —    |
| meta-Бромнитрофенол            | 23,41        | 56                | 65    | 77              | —             | —                | —    |
| Бромпропан [16]                | —            | —                 | —     | —               | —56           | 0                | 138  |
| Бромтолуол                     | 31,12        | 41                | 53    | 67              | 116 (300 МПа) | —                | —    |
| Бромуксусная кислота           | 18,45        | 57                | 64    | 73              | —             | —                | —    |
| Бромэтан                       | 12,58        | —118              | —113  | —107            | —67           | —28              | 80   |
| n-Бутиловый спирт [16]         | 14,81        | —88               | —83   | —76             | —30           | 12               | 132  |
| трет-Бутиловый спирт           | 41,35        | 30                | 44    | 58              | 97 (300 МПа)  | —                | —    |
| Валериановая кислота           | 16,23        | —33               | —26   | —18             | —             | —                | —    |
| Дибензил                       | 36,42        | 55                | 68    | 84              | —             | —                | —    |
| 1,4-Дибромбензол               | 38,51        | 91                | 106   | 123             | —             | —                | —    |
| Дибромметан [16]               | —            | —                 | 27,5  | 34,0            | —             | —                | —    |
| 1,2-Дибромэтан [16]            | —            | —                 | 22,45 | 34,0            | —             | —                | —    |
| 1,4-Диоксан                    | 11,81        | 13                | 17    | 23              | —             | —                | —    |
| Дифениламин                    | 28,0         | 57                | 68    | 80              | 165           | 213 (800 МПа)    | —    |

| Соединение             | $dt_{пл}/dP$ | Давление, МПа |              |       |                 |                 |                  |
|------------------------|--------------|---------------|--------------|-------|-----------------|-----------------|------------------|
|                        |              | 10            | 50           | 100   | 500             | 1000            | 3000             |
| 1,2-Дифенилэтан [16]   | —            | —             | —            | 68,4  | 83,2 (200 МПа)  | —               | —                |
| Дифенилметан           | 60,65        | 33            | 52           | 71    | 119 (300 МПа)   | —               | —                |
| Дихлорметан [16]       | —            | —             | —            | —     | —46             | 0               | 157              |
| Дихлоруксусная кислота | 21,74        | 117           | 126          | 137   | —               | —               | —                |
| Диэтиловый эфир        | 13,66        | —115          | —109         | —102  | —75 (300 МПа)   | —               | —                |
| Додекан                | 24,35        | —7            | 2            | 13    | 79              | —               | —                |
| Иодтолуол              | 31,56        | 38            | 50           | 65    | 115 (300 МПа)   | —               | —                |
| Камфора                | 127,3        | 189           | 214 (30 МПа) | —     | —               | —               | —                |
| Каприловая кислота     | 18,87        | 18            | 26           | 35    | —               | —               | —                |
| орто-Крезол [16]       | 18,13        | 32            | 39           | 69    | 86              | 218             | —                |
| мета-Крезол            | 13,73        | 13            | 19           | 26    | —               | —               | —                |
| пара-Крезол            | 23,08        | 36            | 45           | 56    | 97 (300 МПа)    | —               | —                |
| Кроновая кислота       | 37,29        | 75            | 82 (30 МПа)  | —     | —               | —               | —                |
| орто-Ксилол            | 23,53        | —23           | —13          | —1    | —               | —               | —                |
| мета-Ксилол            | 20,47        | —43           | —35          | —25   | —               | —               | —                |
| пара-Ксилол            | 35,08        | 17            | 31           | 47    | —               | —               | —                |
| Масляная кислота       | 19,12        | —4            | 4            | 14    | —               | —               | —                |
| Ментол                 | 25,10        | 45            | 55           | 65    | 99 (300 МПа)    | —               | —                |
| Метан                  | 27,30        | —180          | —169         | —155  | —101 (300 МПа)  | —               | —                |
| Метилбензоат           | 20,16        | —10           | —2           | 8     | —               | —               | —                |
| Метиловый спирт        | 6,13         | —97           | —95          | —92   | —79 (300 МПа)   | —               | —                |
| Метилосалат            | 22,73        | 57            | 65           | 76    | 151             | —               | —                |
| Метилциклогексан       | 7,11         | —126          | —123         | —119  | —95             | —69             | —                |
| Метилциклопентанол     | 18,34        | 37            | 45           | 54    | —               | —               | —                |
| Миристиновая кислота   | 25,60        | 61            | 70           | 81    | 116 (300 МПа)   | —               | —                |
| Муравьиная кислота     | 13,21        | 10            | 15           | 21    | 40 (300 МПа)    | —               | —                |
| Нафталин               | 39,4         | 84            | 99           | —     | —               | —               | —                |
| Нафтиламин             | 4,93         | 51            | 52 (30 МПа)  | —     | —               | —               | —                |
| 1-Нафтол               | 24,53        | 98            | 108          | 120   | 164 (300 МПа)   | —               | —                |
| Нитробензол [16]       | 23,68        | 8             | 17           | 27,9  | 107             | 184,5           | —                |
| Нитрометан             | 14,0         | —27           | —22          | —15   | —               | —               | —                |
| 1-Нитронафталин        | 4,35         | 59            | 61           | 63    | 72 (300 МПа)    | —               | —                |
| орто-Нитротолуол       | 20,59        | —1            | 7            | 17    | 92              | —               | —                |
| мета-Нитротолуол       | 24,83        | 19            | 28           | 41    | —               | —               | —                |
| пара-Нитротолуол       | 29,05        | 55            | 66           | 79    | —               | —               | —                |
| орто-Нитрофенол        | 22,14        | 48            | 57           | 68    | 110 (300 МПа)   | —               | —                |
| мета-Нитрофенол        | 19,83        | 98            | 106          | 115   | 151 (300 МПа)   | —               | —                |
| пара-Нитрофенол [16]   | 27,26        | 115           | 125,5        | 137,1 | 198,8 (400 МПа) | —               | —                |
| Нонан                  | 13,33        | —52           | —47          | —40   | 8               | 96              | 205              |
| Октадекан              | 25,73        | 30            | 40           | 51    | 119             | —               | —                |
| Пальмитиновая кислота  | 20,75        | 66            | 74           | 84    | —               | —               | —                |
| Пентадекан             | 31,77        | 13            | 25           | 124   | —               | —               | —                |
| Пентахлорэтан          | 22,56        | —27           | —18          | —6    | —               | —               | —                |
| Пиперидин              | 17,30        | —9            | —2           | 6     | —               | —               | —                |
| Пропилбромид           | 12,76        | —109          | —104         | —98   | —53             | —6              | 142              |
| Пропионовая кислота    | 22,50        | —19           | —10          | 0     | —               | —               | —                |
| Салол                  | 26,90        | 44            | 55           | 68    | —               | —               | —                |
| Тетракозан             | 25,31        | 53            | 58 (30 МПа)  | —     | —               | —               | —                |
| Тимол                  | 22,85        | 54            | 62           | 71    | 97 (300 МПа)    | —               | —                |
| Тиофен                 | 54,69        | —33           | —14          | 6     | 105             | —               | —                |
| орто-Толуидин          | 18,80        | —14           | —7           | 3     | 59              | —               | —                |
| пара-Толуидин [16]     | 25,55        | 46            | 56           | 68    | 153             | 204,9 (800 МПа) | —                |
| Трибромметан [16]      | 25,66        | 10            | 20           | 31,5  | 115             | 194             | —                |
| Тридекан               | 24,78        | 12            | 21           | 32    | 101             | —               | —                |
| Трифенилметан          | 38,05        | 96            | 110          | 126   | 178 (300 МПа)   | —               | —                |
| Уксусная кислота [16]  | 24,70        | 19            | 28           | 37,7  | 119             | 148,3           | —                |
| Уретан                 | 114,6        | 59            | 103          | 156   | 81              | 176             | —                |
| Фенол [16]             | 14,7         | 42            | 48           | 53,4  | 115,48          | 184,6           | —                |
| Формамид               | 9,54         | 4             | 7            | 12    | —               | —               | —                |
| Хлорбензол [16]        | 18,89        | —44           | —36          | —28   | 25              | 84,5            | 222<br>(2,5 ГПа) |
| мета-Хлорнитрофенол    | 24,27        | 47            | 57           | 68    | —               | —               | —                |
| Хлороформ [16]         | 16,56        | —62           | —55          | —47   | 17              | 79              | 243<br>(2,5 ГПа) |



| Соединение                | $dt_{пл}/dP$ | Давление, МПа |      |      |              |      |      |
|---------------------------|--------------|---------------|------|------|--------------|------|------|
|                           |              | 10            | 50   | 100  | 500          | 1000 | 3000 |
| Хлорголуол                | 27,81        | 11            | 21   | 34   | 78 (300 МПа) |      | —    |
| Хлоруксусная кислота [16] | 17,34        | 63            | 71   | 80   | 128          | 165  | —    |
| Цетиловый спирт           | 23,84        | 51            | 61   | 72   | —            | —    | —    |
| Циклобутанон              | 24,42        | —49           | —39  | —28  | 13 (300 МПа) |      | —    |
| Циклогексан               | 54,12        | 12            | 33   | 59   | —            | —    | —    |
| Циклогексанол             | 40,82        | 30            | 46   | 66   | —            | —    | —    |
| Энантовая кислота         | 18,27        | —6            | 2    | 11   | —            | —    | —    |
| Этилацетат                | 11,34        | —82           | —78  | —73  | —35          | 5    | 119  |
| Этиловый спирт [16]       | 9,14         | —116          | —113 | —108 | —75          | —38  | 82   |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свойства неорганических соединений:** Справочник/А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.
2. **Термодинамические свойства неорганических веществ/У. Д. Веретенин и др.** Под ред. А. Н. Зефирова. М.: Атомиздат. 1965.
3. **Физико-химические свойства окислов:** Справочник/Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1978.
4. **Landolt-Börnstein Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik.** 4 Teil. Berlin: Springer-Verlag. 1961.
5. **Selected Values of Chemical Thermodynamic properties.** Circular NBS, No 500, Washington. 1952.
6. **Регель А. Р., Глазов В. М.** Периодический закон и физические свойства электронных расплавов. М.: Наука. 1978.
7. **Самсонов Г. В., Вилицкий И. М.** Тугоплавкие соединения: Справочник.— 2-е изд. М.: Металлургия. 1976.
8. **Некрасов Б. В.** Основы общей химии.— 3-е изд. М.: Химия. 1973. Т. 1, 2.
9. **Nuclear Wallet Cards/Ed. V. S. Shirley, C. U. Lederer.** N. Y. 1979.
10. **Свойства элементов:** Справочник/Под ред. М. Е. Друц. М.: Металлургия. 1985.
11. **Термические константы веществ.** Вып. 1—10/Под ред. В. П. Глушко. М.: Изд-во АН СССР. 1965—1982.
12. **Убеллоде А.** Плавление и кристаллическая структура: Пер. с англ./Под ред. А. И. Китайгородского. М.: Мир. 1969.
13. **Свойства органических соединений:** Справочник/Под ред. А. А. Потехина. Л.: Химия. 1984.
14. **Кэй Дж., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1949.
15. **Cannon J. F.** //Phys. and Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3, No 3. P. 781—824.
16. **Справочник химика.** — 3-е изд./Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия, 1971. Т. 1.
17. **Babb S.//Rews. Mod. Phys.** 1963. Vol. 35, No 2. P. 400—412.
18. **Vezzoli G. C., Wilsh P. J.** //High Temp.—High Press. 1977. Vol. 9, No 3. P. 345—349.
19. **Liebenberg D. H. e. a.** //Phys. Rev. B. 1978. Vol. 15, No 9. P. 4526—4532.
20. **Vereshchagin L. F., Fateeva N. S.** //High Temp.—High Press. 1977. Vol. 9, No 6. P. 619—628.
21. **Свенсон К.** Физика высоких давлений: Пер. с англ./Под ред. Л. Ф. Верещагина. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.
22. **Товарные нефтепродукты.** Свойства и применение: Справочник/Под ред. В. М. Школьников. М.: Химия. 1978.
23. **Vaidya S. N.** //High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11, No 3. P. 335—338.
24. **Таблицы физических величин:** Справочник/Под

ред. И. К. Кикоина.— 1-е изд. М.: Атомиздат, 1976.

25. **Фокин М. Н., Русков Ю. С., Мосолов А. В.** Титан и его сплавы в химической промышленности. Л.: Химия, 1978.
26. **Справочник литейщика/Под ред. Н. Н. Рубцова.** М.: Гостехтеориздат. 1962.
27. **Смирязин А. П., Смирязина Н. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник.— 3-е изд. М.: Металлургия. 1974.
28. **Орлов И. Д., Миронов В. М.** Справочник литейщика М.: Гостехтеориздат. 1960.
29. **Анурьев В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя.— 6-е изд. М.: Машиностроение. 1982. Т. 1—3.
30. **Кристаллохимические, физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ/Г. Б. Боккий и др. М.: Изд-во стандартов. 1973.**
31. **Рябцев Н. Г.** Материалы квантовой электроники. М.: Радио, 1972.
32. **Кузьминов Ю. С.** Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука. 1982.
33. **Кузьминов Ю. С.** Ниобат и танталат лития. М.: Наука. 1975.
34. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы) Л.: Энергия. 1976.
35. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды). Л.: Энергия. 1977.
36. **Smithsonian Physical Tables.** 9th ed. Washington. 1954.
37. **Канаев А. А., Копп И. З.** Неводяные пары в энергомашиностроении. М.: Машиностроение. 1973.
38. **Негорючие теплоносители и гидравлические жидкости:** Справочное руководство/Под ред. А. М. Сухолина. Л.: Химия. 1979.
39. **Коган В. А.** Справочник по металлам и сплавам для полиграфистов. М.: Книга. 1976.
40. **Стекло:** Справочник/Под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1973.
41. **Калинчев Э. Л., Саковцева М. Б.** Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. Л.: Химия. 1983.
42. **Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А.** Пластические массы. Свойства и применение: Справочник.— 3-е изд. Л.: Химия, 1978.
43. **Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А.** Полимерные материалы: Справочник. Л.: Химия, 1982.
44. **Справочник по электротехническим материалам.— 2-е изд./Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тараева.** Л.: Энергия. 1976.
45. **Перельштейн И. И., Парушин Е. Б.** Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1984.

# УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ

Э. Б. Гельман

## 13.1 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Уравнением состояния называют уравнение  $f(P, V, T)=0$ , отражающее функциональную связь между температурой  $T$ , давлением  $P$  и объемом  $V$  вещества в состоянии термодинамического равновесия. В настоящее время теоретически обоснованные формы уравнения состояния получены только для вещества в твердом кристаллическом и газообразных состояниях.

Уравнение состояния твердого тела наиболее разработано в форме уравнения Ми — Грюнейзена [1]

$$PV = P_0V + 2\gamma E,$$

где  $P_0$  — давление при  $T=0$ ;  $\gamma$  — постоянная Грюнейзена;  $E$  — тепловая энергия кристаллической решетки.

Значение  $P_0$  определяется структурой решетки и потенциалом взаимодействия ее частиц и для некоторых веществ может быть записано в виде

$$P_0 = Ar^{-2} \exp \{b(1-r)\} - Kr^{-m},$$

где  $r=(V/V_0)^{1/3}$  ( $V_0$  — объем тела при нормальных условиях,  $\text{м}^3$ ; параметр  $m=4$  для молекулярных кристаллов и  $m=9$  для ионных кристаллов и нещелочных и других металлов с сильным перекрытием электронных оболочек; параметры  $A$ ,  $K$  и  $b$  определяются из эксперимента и для ряда веществ приведены в табл. 13.1.

Слагаемое  $2\gamma E$  в уравнении Ми — Грюнейзена учитывает влияние температуры; его значение может быть сравнено со значением  $P_0V$ , а при высоких температурах и превосходить его.

Постоянная Грюнейзена [2]  $\gamma = \beta V / k_T C_V$ , где  $\beta$  — объемный коэффициент температурного расширения;  $C_V$  — теплоемкость тела при постоянном объеме;  $k_T$  — изотермический коэффициент сжимаемости, слабо зависит от температуры и объема. Тепловая энергия решетки в первом приближении равна  $E = (3/2)RT$  (для одного моля вещества), ее значение может уточняться в рамках теории твердого тела (Дебая, Эйнштейна и др.).

## 13.2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Единственной теоретически обоснованной формой уравнения состояния газа является вириальное уравнение состояния [3]

$$PV/RT = 1 + B/V + C/V^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $V$  — объем одного моля газа,  $\text{см}^3/\text{моль}$ ;  $R$  — газовая постоянная;  $B$ ,  $\text{см}^3/\text{моль}$ ;  $C$ ,  $\text{см}^6/\text{моль}^2$  — второй, третий и т. д. вириальные коэффициенты, которые зависят от температуры и не зависят от давления и плотности газа. При малой плотности ( $V \rightarrow \infty$ ) уравнение (1) вырождается в уравнение состояния идеального газа  $PV=RT$ ; второе, третье слагаемые и т. д. описывают по-

Таблица 13.1. Постоянная Грюнейзена и параметры уравнения состояния Ми — Грюнейзена некоторых веществ ( $\gamma_s$  — постоянная Грюнейзена при степени сжатия  $s = V/V_0$ )

| Вещество | $\gamma_1$ | $\gamma_{0,6}$ | $A, 10^{10} \text{ Па}$ | $b$ | $K, 10^{10} \text{ Па}$ |
|----------|------------|----------------|-------------------------|-----|-------------------------|
|----------|------------|----------------|-------------------------|-----|-------------------------|

### Металлы и полупроводники

|    |      |     |         |         |         |
|----|------|-----|---------|---------|---------|
| Ag | 2,47 | 1,9 | 2,6887  | 13,5293 | 2,8691  |
| Al | 2,13 | 1,6 | 2,4433  | 10,9916 | 2,6180  |
| Au | 3,05 | 2,6 | 8,8721  | 7,9029  | 9,0935  |
| Be | 1,17 | 1,0 | 1,7918  | 19,9553 | 2,0571  |
| Cd | 2,27 | 1,6 | 24,9938 | 2,5933  | 24,9224 |
| Co | 1,99 | 1,6 | 90,2906 | 2,6438  | 90,5267 |
| Cu | 2,04 | 1,6 | 5,2703  | 9,9448  | 5,4910  |
| Fe | 1,68 | 1,3 | 9,9743  | 7,0985  | 10,1639 |
| Ge | 0,72 | 0,4 | 4,5765  | 7,1077  | 4,6185  |
| In | 2,24 | 2,0 | 1,2274  | 11,5108 | 1,3320  |
| Mg | 1,46 | 1,1 | 2,8386  | 5,7902  | 2,9191  |
| Mo | 1,58 | 1,2 | 15,8570 | 7,0914  | 15,9899 |
| Nb | 1,68 | 1,4 | 19,8079 | 4,6213  | 19,9267 |
| Ni | 1,91 | 1,4 | 4,7646  | 13,9474 | 4,9922  |
| Pb | 2,78 | 2,4 | 1,7719  | 9,3517  | 1,8836  |
| Pd | 2,18 | 1,4 | 5,4307  | 12,3419 | 5,6172  |
| Pt | 2,63 | 2,2 | 13,6590 | 8,3348  | 13,8758 |
| Rh | 2,26 | 2,0 | 27,3303 | 5,3840  | 27,5471 |
| Sb | 0,86 | 0,2 | 1,0437  | 13,0215 | 1,0790  |
| Si | 0,74 | 0,3 | 4,3669  | 8,8513  | 4,4217  |
| Sn | 2,03 | 1,5 | 1,6923  | 11,6741 | 1,7868  |
| Ta | 1,69 | 1,3 | 9,5038  | 7,5979  | 9,6194  |
| Th | 1,12 | 0,6 | 2,6096  | 8,1274  | 2,6512  |
| Ti | 1,18 | 0,8 | 1,3882  | 23,8180 | 1,4761  |
| U  | 1,83 | 1,4 | 4,4319  | 10,2740 | 4,5397  |
| V  | 1,29 | 1,0 | 9,2284  | 7,1227  | 9,3461  |
| W  | 1,55 | 1,2 | 17,3243 | 7,3234  | 17,4481 |
| Zn | 2,38 | 1,6 | 1,8403  | 12,1914 | 2,0362  |
| Zr | 0,77 | 0,6 | 3,8994  | 8,6963  | 3,9410  |

### Ионные кристаллы и минералы

|                                |      |     |         |         |         |
|--------------------------------|------|-----|---------|---------|---------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,60 | 1,4 | 41,4459 | 4,2629  | 41,7202 |
| CsBr                           | 1,93 | 1,5 | 0,8952  | 7,5090  | 0,9547  |
| CsCl                           | 1,97 | 1,4 | 0,5567  | 11,4866 | 0,6259  |
| CsI                            | 2,01 | 1,5 | 0,5456  | 9,0538  | 0,5968  |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 1,40 | 1,0 | 26,6830 | 3,9333  | 26,8730 |
| FeS <sub>2</sub>               | 1,50 | 0,9 | 4,1727  | 12,7322 | 4,3377  |
| MgO                            | 1,40 | 1,0 | 10,7374 | 6,7287  | 10,9796 |
| NaBr                           | 1,56 | 1,0 | 0,6910  | 10,8196 | 0,7644  |
| NaCl                           | 1,55 | 1,0 | 1,0849  | 8,9488  | 1,1733  |
| NaI                            | 1,59 | 1,0 | 0,4397  | 12,3490 | 0,4972  |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,71 | —   | 1,1129  | 12,6690 | 1,2123  |
| Андрадит                       | 1,1  | 0,5 | 4,6282  | 11,9457 | 4,8305  |
| Гранат                         | 1,4  | 1,2 | 29,4744 | 3,8243  | 29,7665 |
| Гроссулярит                    | 1,0  | 0,2 | 2,6384  | 17,6332 | 2,8428  |
| Диопсид                        | 0,9  | 0,2 | 2,2236  | 17,0914 | 2,3652  |
| Лабрадор                       | 0,4  | 0,2 | 10,0589 | 4,1678  | 10,1128 |
| Оливин                         | 1,2  | 1,0 | 25,5397 | 3,4413  | 25,7285 |
| Ортоклаз                       | 0,5  | 0,1 | 3,4593  | 6,7857  | 3,5255  |

Таблица 13.2. Второй вириальный коэффициент газов  $B$ , см<sup>3</sup>/моль [6]

| $T$ , К | Ar     | CF <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> | CH <sub>3</sub> Cl | CH <sub>3</sub> F | CHCl <sub>3</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> |
|---------|--------|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 293,15  | -16,85 | -91,18          | -45,19          | -439,61            | -193,28           | -1430,49          | -162                          | -145,92                       | -381,96                       |
| 400     | -0,82  | -33,71          | -15,69          | -208,31            | -103,88           | -580,56           | -87                           | -72,30                        | -171,68                       |
| 500     | 7,17   | -4,50           | -0,81           | -128,24            | -58,66            | -348,42           | -51                           | -35,92                        | -66,09                        |
| 600     | 12,25  | 13,57           | 8,67            | -86,32             | -34,70            | -241,47           | -28                           | -13,08                        | -0,75                         |
| 700     | 15,67  | 26,03           | 15,00           | -60,79             | -20,16            | -181,03           | -12                           | 2,47                          | 44,75                         |
| 800     | 18,09  | 34,94           | 19,63           | -43,80             | -10,48            | -142,42           | -1                            | 13,85                         | 77,11                         |
| 900     | 19,84  | 41,47           | 22,96           | -31,64             | -3,64             | -115,76           | 7                             | 22,19                         | 101,40                        |
| 1000    | 21,19  | 46,55           | 25,59           | -22,60             | 1,41              | -96,34            | 14                            | 28,64                         | 120,22                        |
| 1200    | 23,01  | 53,62           | 29,22           | -10,04             | 8,04              | -69,77            | 23                            | 37,84                         | 146,60                        |
| 1400    | 24,03  | 58,25           | 31,60           | -1,83              | 12,51             | -52,51            | 29                            | 44,04                         | 164,09                        |
| 1600    | 24,86  | 61,20           | 33,06           | 3,89               | 15,51             | -40,45            | 34                            | 48,36                         | 176,27                        |
| 1800    | 25,49  | 63,21           | 34,08           | 7,23               | 17,70             | -31,57            | 37                            | 51,53                         | 184,50                        |
| 2000    | 25,91  | 64,91           | 35,00           | 11,04              | 19,90             | -24,80            | 39                            | 53,78                         | 190,26                        |
| 2400    | 26,24  | 67,35           | 36,26           | 15,60              | 20,54             | -15,12            | 43                            | 56,55                         | 199,06                        |

Продолжение табл. 13.2

| $T$ , К | CO     | CO <sub>2</sub> | F <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | He    | Kr     | N <sub>2</sub> [33] | NH <sub>3</sub> |
|---------|--------|-----------------|----------------|----------------|------------------|-------|--------|---------------------|-----------------|
| 293,15  | -10,04 | -97,94          | -20,97         | 12,16          | —                | 11,15 | -53,79 | -5,47               | -302,71         |
| 400     | 7,64   | -49,07          | -1,58          | 14,36          | -333,23          | 10,94 | -22,88 | 9,183               | -120,11         |
| 500     | 16,57  | -25,0           | 8,09           | 14,98          | -163,47          | 10,72 | -7,25  | 16,45               | -68,30          |
| 600     | 22,14  | -9,89           | 14,22          | 15,66          | -98,83           | 10,51 | 2,56   | 21,01               | -45,97          |
| 700     | 25,85  | 0,39            | 18,37          | 16,38          | -66,30           | 10,32 | 9,23   | 24,03               | -29,77          |
| 800     | 28,49  | 7,92            | 21,26          | 16,68          | -47,22           | 10,13 | 14,01  | 26,12               | -20,83          |
| 900     | 30,39  | 13,43           | 23,41          | 16,70          | -34,85           | 9,97  | 17,60  | 27,63               | -14,67          |
| 1000    | 31,80  | 17,70           | 25,03          | 16,72          | -26,19           | 9,81  | 20,32  | 28,73               | -10,19          |
| 1200    | 33,48  | 23,81           | 27,29          | 16,69          | -15,07           | 9,58  | 24,20  | 30,08               | -4,18           |
| 1400    | 34,76  | 27,92           | 28,53          | 16,55          | -8,08            | 9,37  | 26,76  | 30,95               | -0,38           |
| 1600    | 35,56  | 30,78           | 29,47          | 16,39          | -3,83            | 9,15  | 28,53  | 31,59               | 2,18            |
| 1800    | 36,19  | 32,87           | 30,25          | 16,22          | -0,68            | 8,93  | 29,65  | 31,87               | 3,93            |
| 2000    | 36,36  | 34,44           | 30,78          | 16,06          | 1,47             | 8,72  | 30,49  | 32,04               | 5,37            |
| 2400    | 36,70  | 36,28           | 31,21          | 15,69          | 4,69             | 8,44  | 31,84  | 32,13               | 7,30            |

Продолжение табл. 13.2

| $T$ , К | NO     | N <sub>2</sub> O | Ne    | O <sub>2</sub> | O <sub>3</sub> | SF <sub>6</sub> | SO <sub>2</sub> | SiF <sub>4</sub> | Xe      |
|---------|--------|------------------|-------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------|
| 293,15  | -18,25 | -137,07          | 11,02 | -17,00         | -106,87        | -292,12         | -573            | -144,01          | -134,59 |
| 400     | -3,98  | -65,42           | 12,47 | 0,03           | -54,20         | -139,43         | -339            | -50,25           | -70,79  |
| 500     | 3,36   | -29,82           | 13,19 | 8,53           | -27,73         | -63,54          | -123,46         | -3,09            | -39,83  |
| 600     | 7,90   | -7,83            | 13,62 | 13,91          | -11,19         | -15,95          | -84,62          | 26,56            | -20,40  |
| 700     | 10,98  | 7,46             | 13,77 | 17,49          | -0,15          | 16,41           | -61,30          | 46,95            | -6,92   |
| 800     | 13,19  | 18,43            | 13,87 | 20,06          | 7,96           | 39,66           | -45,85          | 61,35            | 2,55    |
| 900     | 14,81  | 26,63            | 13,91 | 21,92          | 14,03          | 57,05           | -32,92          | 71,97            | 9,67    |
| 1000    | 16,04  | 32,98            | 13,88 | 23,33          | 18,71          | 70,50           | -26,81          | 80,18            | 15,29   |
| 1200    | 17,77  | 41,96            | 13,75 | 25,28          | 25,37          | 89,57           | -15,57          | 91,72            | 23,25   |
| 1400    | 18,79  | 47,94            | 13,61 | 26,35          | 29,83          | 102,28          | -8,21           | 99,23            | 28,53   |
| 1600    | 19,47  | 52,13            | 13,46 | 27,21          | 32,95          | 111,16          | -3,05           | 103,99           | 32,32   |
| 1800    | 20,02  | 53,13            | 13,31 | 27,86          | 35,24          | 117,59          | 0,73            | 107,21           | 35,10   |
| 2000    | 20,47  | 57,19            | 13,16 | 28,30          | 36,96          | 121,89          | 3,62            | 109,90           | 37,19   |
| 2400    | 20,95  | 59,97            | 12,87 | 28,62          | 38,90          | 127,80          | 7,63            | 113,92           | 39,91   |

Таблица 13.3. Третий вириальный коэффициент газов  $C$ , см<sup>6</sup>/моль<sup>2</sup> [6]

| $T, K$ | Ar  | CO <sub>2</sub> | F <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | He    | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | SF <sub>6</sub> |
|--------|-----|-----------------|----------------|----------------|------------------|-------|----------------|----------------|-----------------|
| 293,15 | 960 | 3159            | 1368           | 297            | —                | 98,78 | 1437           | 1127           | 35 868          |
| 400    | 848 | 2499            | 1205           | 283            | —                | 89,48 | 1332           | 1000           | 28 388          |
| 500    | 807 | 2173            | 1146           | 271            | —                | 82,90 | 1288           | 954            | 25 044          |
| 600    | 785 | 2005            | 1113           | 260            | 4650             | 77,63 | 1258           | 928            | 23 361          |
| 700    | 769 | 1911            | 1090           | 251            | 2840             | 73,29 | 1233           | 910            | 22 427          |
| 800    | 756 | 1852            | 1072           | 242            | 2170             | 69,65 | 1210           | 894            | 21 846          |
| 900    | 744 | 1814            | 1056           | 234            | 1570             | 66,57 | 1188           | 880            | 21 442          |
| 1000   | 733 | 1786            | 1040           | 227            | 1090             | 63,85 | 1167           | 867            | 21 131          |
| 1200   | 713 | 1744            | 1011           | 215            | 715              | 60,50 | 1128           | 841            | 20 646          |
| 1400   | 693 | 1709            | 983            | 204            | 537              | 57,40 | 1092           | 819            | 20 233          |
| 1600   | 675 | 1679            | 959            | 195            | 412              | 54,30 | 1059           | 797            | 19 853          |
| 1800   | 658 | 1650            | 934            | 188            | 366              | 51,20 | 1028           | 777            | 19 492          |
| 2000   | 642 | 1622            | 912            | 181            | 319              | 48,09 | 1000           | 758            | 19 148          |
| 2400   | 613 | 1571            | 872            | 169            | 246              | 44,73 | 951            | 724            | 18 514          |

правку на неидеальность газа, обусловленную соответственно двойными, тройными взаимодействиями и т. д. его частиц. Значения второго и третьего вириальных коэффициентов некоторых газов приведены в табл. 13.2 и 13.3.

Помимо уравнения (1) иногда используют разложение  $P/P_0$  в ряд по давлению  $P/P_0 = 1 + B'P + C'P^2 + \dots$ , коэффициенты которого связаны с вириальными коэффициентами соотношениями  $B = RTB'$ ,  $C = (RT)^2(C' + B'^2)$  и т. д.

Для представления экспериментальных данных часто употребляются различные эмпирические уравнения состояния [4]. В простейшем случае такие уравнения содержат два параметра, которые можно вычислить по известным значениям критических температуры  $T_{кр}$ , давления  $P_{кр}$  и объема  $V_{кр}$ , приведенным в табл. 13.4—13.6. Наиболее употребительными из двухпараметрических уравнений являются:

уравнение Ван-дер-Ваальса [4, 5]

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

$$a = \frac{27}{24} RT_{кр} V_{кр}, \quad b = \frac{1}{3} V_{кр},$$

уравнение Дитеричи [4]

$$P(V - b) = RT \exp \{-a/RTV\},$$

$$a = 2RT_{кр} V_{кр}, \quad b = \frac{1}{2} V_{кр};$$

уравнение Бертело [4]

$$(P + a/TV^2)(V - b) = RT,$$

$$a = \frac{16}{3} RT_{кр} V_{кр}^2, \quad b = \frac{1}{4} V_{кр};$$

уравнение Редлиха—Квонга [29]

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{T^{1/2} V(V + b)},$$

$$a = 0,4278R^2 \frac{T_{кр}^{5/2}}{P_{кр}}, \quad b = 0,26V_{кр}.$$

Иногда используют также эмпирические уравнения состояния, содержащие большее число параметров: модифицированное уравнение Редлиха—Квонга с тремя параметрами [30], уравнение Битти—Бриджмена с шестью параметрами [31], уравнение Бенедикта—Вебба—Рубина с восемью параметрами [32] и др.

Точность аппроксимации эмпирическими уравнениями состояния индивидуальна по отношению к исследуемому газу и зависит от размера области изменения переменных, достигая в отдельных случаях нескольких долей процента. Среди двухпараметрических уравнений состояния наиболее точным часто оказывается уравнение Редлиха—Квонга. В табл. 13.4—13.6 приведены значения постоянных Ван-дер-Ваальса для некоторых простых веществ, неорганических и органических соединений. Постоянные  $a_{AB}$ ,  $b_{AB}$  химического соединения АВ можно приблизительно вычислить через постоянные  $a_A$ ,  $b_A$  и  $a_B$ ,  $b_B$  компонентов А и В этого соединения:

$$\sqrt{\hat{a}_{AB}} = \sqrt{\hat{a}_A} + \sqrt{\hat{a}_B}, \quad b_{AB} = b_A + b_B.$$

Аналогично можно вычислить постоянные  $a_{A+B}$ ,  $b_{A+B}$  для смеси А+В компонентов А, В:

$$\sqrt{a_{A+B}} = x\sqrt{a_A} + (1-x)\sqrt{a_B};$$

$$b_{A+B} = xb_A + (1-x)b_B,$$

где  $x$  — концентрация компонента А в смеси. Более точные методы вычисления постоянных Ван-дер-Ваальса см. в [5].

### 13.3. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ

Для всякого вещества существуют такие значения температуры  $T_{кр}$ , К, давления  $P_{кр}$ , Па, объема  $V_{кр}$ , см<sup>3</sup>/моль, и плотности  $\rho_{кр}$ , г/см<sup>3</sup>, которые называются критическими температурой, давлением, объемом и плотностью соответственно (в совокупности — критическими

Таблица 13.4. Критические параметры и постоянные Ван-дер-Ваальса простых веществ [9].  
В круглых скобках указана погрешность приведенного значения

| Вещество                 | Формула                     | $T_{кр}$ , К | $P_{кр}$ , МПа | $\rho_{кр}$ , г/см <sup>3</sup> | $V_{кр}$ , см <sup>3</sup> /моль | $a$ , $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b$ , см <sup>3</sup> /моль |
|--------------------------|-----------------------------|--------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Азот                     | N <sub>2</sub>              | 126,25 (4)   | 3,399 (2)      | 0,304 (2)                       | 92,1 (6)                         | 0,1368                             | 38,607                      |
| Аргон                    | Ar                          | 150,65 (10)  | 4,86 (1)       | 0,531 (1)                       | 75,2                             | 0,1361                             | 32,191                      |
| Бром                     | Br <sub>2</sub>             | 584 (5)      | 10,3 (5)       | 1,18                            | 135                              | 0,9624                             | 58,724                      |
| Водород:                 |                             |              |                |                                 |                                  |                                    |                             |
| нормальный               | <i>n</i> -H <sub>2</sub>    | 33,24 (5)    | 1,297 (3)      | 0,0310                          | 65,5                             | 0,02484                            | 26,635                      |
| равновесный              | <i>p</i> -H <sub>2</sub>    | 32,98        | 1,293          | 0,0314                          | 64,2                             | 0,02604                            | 27,313                      |
| пара-                    | <i>para</i> -H <sub>2</sub> | 32,98 (2)    | 1,293 (3)      | 0,03116                         | 64,7                             | 0,02453                            | 26,509                      |
| Водорододейтерий         | HD                          | 35,91 (2)    | 1,484 (6)      | 0,0484                          | 62,8                             | 0,02535                            | 25,158                      |
| Водородотритий           | HT                          | 38,3         | 1,66           | 0,0667                          | 60,3                             | 0,02574                            | 23,953                      |
| Вольфрам [14]            | W                           | >11 880 [10] | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Гелий                    | He                          | 5,20 (10)    | 0,229 (1)      | 0,0693                          | 57,5                             | 0,00344                            | 23,599                      |
| Гелий-3                  | <sup>3</sup> He             | 3,34 (2)     | 0,116 (3)      | 0,0414 [20]                     | 72,5 [20]                        | 0,00279                            | 29,789                      |
| Дейтерий:                |                             |              |                |                                 |                                  |                                    |                             |
| нормальный               | <i>n</i> -D <sub>2</sub>    | 38,350 (2)   | 1,6650 (5)     | 0,0623                          | 60,3                             | 0,02576                            | 23,940                      |
| равновесный              | <i>p</i> -D <sub>2</sub>    | 38,2         | 1,65           | 0,0669                          | 60,3                             | 0,02577                            | 24,037                      |
| пара-                    | <i>para</i> -D <sub>2</sub> | 38,26 (4)    | 1,6498 (61)    | 0,0623                          | 60,3                             | 0,02588                            | 24,104                      |
| Дейтеротритий            | DT                          | 39,5         | 1,75           | 0,0867                          | 58,5                             | 0,02596                            | 23,418                      |
| Золото [10]              | Au                          | >4820 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Иод                      | I <sub>2</sub>              | 826 (20)     | —              | 0,155 [12]                      | 155 [20]                         | 1,1976                             | 51,667                      |
| Кадмий                   | Cd                          | >2480 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Калий                    | K                           | 2280 (50)    | 15,8 (1,0)     | 0,194 (25)                      | 202 (26)                         | 9,5908                             | 149,90                      |
| Кислород                 | O <sub>2</sub>              | 154,78 (5)   | 5,081 (10)     | 0,41 (2)                        | 78                               | 0,1375                             | 31,662                      |
| Криптон                  | Kr                          | 209,38 (10)  | 5,50 (1)       | 0,908                           | 92,3                             | 0,2324                             | 39,549                      |
| Ксенон                   | Xe                          | 289,74 (1)   | 5,841 (1)      | 1,099 (3)                       | 119,47                           | 0,4192                             | 51,557                      |
| Литий [10]               | Li                          | 3223 (600)   | 69,4 (17,2)    | 0,12                            | 58 (15)                          | 4,3645                             | 48,258                      |
| Медь [10]                | Cu                          | >5390 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Молибден [15]            | Mo                          | 11 150 (550) | 553,3 (117,5)  | 2,62                            | 36,5 (3,5)                       | 6,5534                             | 20,945                      |
| Назрий                   | Na                          | 2503 (50)    | 25,6 (1,5)     | 0,207 (30)                      | 111 (16)                         | 7,1270                             | 101,47                      |
| Неон                     | Ne                          | 44,45 (10)   | 2,72 (1)       | 0,484 (1)                       | 41,7                             | 0,0211                             | 16,948                      |
| Ниобий [10]              | Nb                          | >9880 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Озон                     | O <sub>3</sub>              | 261,05 (10)  | 5,53 (1)       | 0,537                           | 89,4                             | 0,3592                             | 49,038                      |
| Платина [10]             | Pt                          | >6450 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Радон                    | Rn                          | 377,5        | 6,326 (2)      | 1,613 [11]                      | 137 [11]                         | 0,6570                             | 62,019                      |
| Ртуть [10]               | Hg                          | 1763 (15)    | 153,5 (1,5)    | 5,3 (5)                         | 36,5                             | 0,5905                             | 11,936                      |
| Рубидий                  | Rb                          | 2106 (15)    | 16,2 [10]      | 0,347 (35)                      | 246 (25)                         | 7,9782                             | 135,00                      |
| Свинец [10]              | Pb                          | >3970 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Селен* <sup>1</sup> [19] | Se                          | 1590 (20)    | 38,5 (3,0)     | 1,235 [17]                      | 147 [17]                         | 1,9148                             | 42,916                      |
| Сера* <sup>2</sup> [18]  | S                           | 1313 (5)     | 18,21          | 0,563                           | 158                              | 2,7611                             | 74,941                      |
| Серебро [10]             | Ag                          | >4300 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Тритий нормальный        | <i>n</i> -T <sub>2</sub>    | 43,7         | 2,11           | 0,112                           | 53,7                             | 0,02642                            | 21,549                      |
| Фосфор                   | P                           | 968 (20)     | 8,1 (5)        | 0,144 [12]                      | 215 [12]                         | 3,3711                             | 124,10                      |
| Фтор                     | F <sub>2</sub>              | 144          | 5,6            | 0,574 [16]                      | 66,2 [12]                        | 0,1085                             | 26,854                      |
| Хлор                     | Cl <sub>2</sub>             | 417 (5)      | 7,71           | 0,573                           | 124                              | 0,6576                             | 56,202                      |
| Цезий                    | Cs                          | 2043 (15)    | 11,8 (3)       | 0,43 (4)                        | 308 (30)                         | 10,356                             | 180,64                      |
| Цинк [10]                | Zn                          | >2590 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Цирконий [10]            | Zr                          | >8950 [14]   | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |

\*<sup>1</sup> В критической точке среднее число атомов в молекуле Se равно 2,3 [17].

\*<sup>2</sup> В критической точке среднее число атомов в молекуле F равно 2,78 [18].

Таблица 13.5. Критические параметры и постоянные Ван-дер-Ваальса неорганических соединений [9].  
В круглых скобках указана погрешность приведенного значения

| Вещество          | Формула            | $T_{кр}$ , К | $P_{кр}$ , МПа | $\rho_{кр}$ , г/см <sup>3</sup> | $V_{кр}$ , см <sup>3</sup> /моль | $a$ , $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b$ , см <sup>3</sup> /моль |
|-------------------|--------------------|--------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Азот:             |                    |              |                |                                 |                                  |                                    |                             |
| дифторхлорид [20] | NF <sub>2</sub> Cl | 337,4        | 5,15           | —                               | —                                | 0,6450                             | 68,122                      |
| закись            | N <sub>2</sub> O   | 309,58 (1)   | 7,255 (1)      | 0,453 (1)                       | 97,27                            | 0,3852                             | 44,347                      |

| Вещество               | Формула                             | $T_{\text{кр}}, \text{K}$ | $P_{\text{кр}}, \text{МПа}$ | $\rho_{\text{кр}}, \text{г/см}^3$ | $V_{\text{кр}}, \text{см}^3/\text{моль}$ | $a, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$ | $b, \text{см}^3/\text{моль}$ |
|------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|
| оксид                  | NO                                  | 180 (1)                   | 6,54 (2)                    | 0,52                              | 58                                       | 0,1444                                               | 28,579                       |
| оксидфторид            | NOF <sub>2</sub>                    | 349,45 (50)               | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| перекись               | NO <sub>2</sub>                     | 431 (1)                   | 10,1 (1)                    | 0,56                              | 82                                       | 0,5346                                               | 44,206                       |
| трифторид              | NF <sub>3</sub>                     | 233,10 (10)               | 4,531 (12)                  | 0,574 [12]                        | 123,8 [12]                               | 0,3497                                               | 53,462                       |
| фтордихлорид           | NFCl <sub>2</sub>                   | 337,45 (1)                | 5,15 (5)                    | —                                 | —                                        | 0,6452                                               | 68,1316                      |
| Алюминий:              |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| трибромид              | AlBr <sub>3</sub>                   | 763 (2)                   | 2,89 (6)                    | 0,861 (5)                         | 310 [20]                                 | 5,8791                                               | 274,59                       |
| триодид [12]           | AlI <sub>3</sub>                    | 955 [20]                  | —                           | 1,002                             | 407                                      | 3,6356                                               | 135,67                       |
| трихлорид              | AlCl <sub>3</sub>                   | 625,65 (50)               | 2,64 (5)                    | 0,51 (3)                          | 261 [20]                                 | 4,3165                                               | 245,86                       |
| Аммиак                 | NH <sub>3</sub>                     | 405,45 (5)                | 11,283 (5)                  | 0,233                             | 73,1                                     | 0,4249                                               | 37,347                       |
| Арсин [20]             | AsH <sub>3</sub>                    | 373,0                     | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| Бор:                   |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| трибромид              | BBr <sub>3</sub>                    | 573 (5)                   | —                           | 0,9 (1)                           | 278 [22]                                 | 1,4900                                               | 92,667                       |
| триодид [12]           | BI <sub>3</sub>                     | 773,15                    | —                           | 1,10                              | 356                                      | 2,5745                                               | 118,67                       |
| трифторид              | BF <sub>3</sub>                     | 260,85 (10)               | 4,98 (2)                    | 0,59 [12]                         | 115 [12]                                 | 0,3980                                               | 54,379                       |
| трихлорид              | BCl <sub>3</sub>                    | 451,95 (10)               | 3,87 (1)                    | 0,7 (1)                           | 150 (20)                                 | 1,5390                                               | 121,35                       |
| Ванадия оксихлорид     | VOCl <sub>3</sub>                   | 636 [20]                  | —                           | 0,60 [20]                         | 290                                      | 1,7252                                               | 96,667                       |
| Висмут:                |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| трибромид              | BiBr <sub>3</sub>                   | 1220 (5)                  | 8,41                        | 1,487 (15)                        | 302                                      | 5,1612                                               | 150,76                       |
| трихлорид              | BiCl <sub>3</sub>                   | 1178 (5)                  | 11,97 (40)                  | 1,210 (6)                         | 261                                      | 3,3818                                               | 102,31                       |
| Воздух                 | —                                   | 413,8                     | 3,77                        | 0,35                              | —                                        | 1,3247                                               | 114,09                       |
| Вода (водорода окись)  | H <sub>2</sub> O                    | 647,30 (5)                | 22,12 (1)                   | 0,32 (1)                          | 56,3                                     | 0,5524                                               | 30,413                       |
| Водород:               |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| бромистый              | HBr                                 | 362,95 (20)               | 8,51 (5)                    | 0,807 [22]                        | 100 [22]                                 | 0,4514                                               | 44,317                       |
| иодистый               | HI                                  | 423 (1)                   | 8,22 (10)                   | 1,09                              | 117                                      | 0,6350                                               | 53,496                       |
| селенистый             | H <sub>2</sub> Se                   | 411 (1)                   | 8,9                         | 0,349 [13]                        | 97,7 [13]                                | 0,5525                                               | 47,903                       |
| сернистый              | H <sub>2</sub> S                    | 373,55 (10)               | 9,01 (1)                    | 0,349                             | 97,7                                     | 0,4518                                               | 43,097                       |
| фтористый              | HF                                  | 461 (3)                   | 6,49 (35)                   | 0,29                              | 69                                       | 0,9542                                               | 76,760                       |
| хлористый              | HCl                                 | 324,55 (50)               | 8,26 (1)                    | 0,42                              | 86,8                                     | 0,3720                                               | 40,844                       |
| цианистый              | HCN                                 | 465,65 (50)               | 5,39 (2)                    | 0,195                             | 139                                      | 1,1281                                               | 88,039                       |
| Водорода перекись [12] | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>       | 708,5                     | 15,54                       | 0,349                             | 97,5                                     | 0,9418                                               | 47,372                       |
| Вольфрам:              |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| гексафторид            | WF <sub>6</sub>                     | 444 (5)                   | 4,4 (4)                     | 1,28 (3)                          | 233                                      | 1,3195                                               | 105,90                       |
| гексахлорид            | WCl <sub>6</sub>                    | 923 (3)                   | 4,9 (5)                     | 0,94 (3)                          | 420                                      | 5,0040                                               | 193,20                       |
| тетрахлороксид         | WOCl <sub>4</sub>                   | 782 (4)                   | 5,3 (3)                     | 1,01 (4)                          | 338                                      | 3,3847                                               | 154,24                       |
| трихлороксид           | WOCl <sub>3</sub>                   | 637 (3)                   | —                           | 0,60 (3)                          | 289                                      | 1,7220                                               | 96,333                       |
| Гафний:                |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| тетрабромид            | HfBr <sub>4</sub>                   | 746 (6)                   | 4,1 (5)                     | 1,20 (10)                         | 415                                      | 3,9066                                               | 186,62                       |
| тетраиодид             | HfI <sub>4</sub>                    | 913 (3)                   | 3,9 (5)                     | 1,30 (10)                         | 530                                      | 6,1515                                               | 240,11                       |
| тетрахлорид            | HfCl <sub>4</sub>                   | 724 (2)                   | 5,7 (3)                     | 1,05 (2)                          | 304 [20]                                 | 2,6940                                               | 132,60                       |
| Германия тетрафторид   | GeCl <sub>4</sub>                   | 552 (2)                   | 3,85 (5)                    | 0,65 (1)                          | 330                                      | 2,3078                                               | 148,99                       |
| Гидразин               | N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>       | 653                       | 14,7                        | 0,230 [12]                        | 139 [12]                                 | 0,8464                                               | 46,190                       |
| Гидразина тетрафторид  | N <sub>2</sub> F <sub>4</sub>       | 309                       | 3,7 [20]                    | 0,574 [12]                        | 181 [12]                                 | 0,7427                                               | 85,656                       |
| Дейтерий:              |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| бромистый              | D <sub>2</sub> Br                   | 362,0 [20]                | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| иодистый               | DI                                  | 421,8 [20]                | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| селенистый             | D <sub>2</sub> Se                   | 412,35                    | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| сернистый              | D <sub>2</sub> S                    | 372,25                    | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| хлористый              | DCl                                 | 323,4 [20]                | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| оксид                  | D <sub>2</sub> O                    | 644,05 (10)               | 21,86 (3)                   | 0,363                             | 55,1                                     | 0,5535                                               | 30,625                       |
| перекись [12]          | D <sub>2</sub> O <sub>2</sub>       | 717                       | 13,9                        | —                                 | —                                        | 1,0722                                               | 53,290                       |
| Дейтероаммиак          | ND <sub>3</sub>                     | 405,45 (30)               | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| Дейтероарсин           | AsD <sub>3</sub>                    | 372,0 [20]                | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| Диборан                | B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>       | 289,85 (2)                | 4,00 (2)                    | 0,14 (3)                          | 170 (10)                                 | 0,6121                                               | 75,263                       |
| цис-Дифтордиазин       | цис-N <sub>2</sub> F <sub>2</sub>   | 272                       | 5,8 [12]                    | 0,559 [12]                        | 118 [12]                                 | 0,3736                                               | 48,944                       |
| транс-Дифтордиазин     | транс-N <sub>2</sub> F <sub>2</sub> | 260                       | 5,6                         | 0,584 [12]                        | 113 [12]                                 | 0,3537                                               | 48,486                       |
| Дициан                 | C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>       | 400 (1)                   | 6,0 (1)                     | —                                 | —                                        | 0,7805                                               | 69,536                       |
| Железа пентакарбонил   | Fe(CO) <sub>5</sub>                 | 563 (10)                  | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| Молибден:              |                                     |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| гексафторид            | MoF <sub>6</sub>                    | 473 (5)                   | 4,8 (4)                     | 0,93 (3)                          | 226                                      | 1,3700                                               | 103,22                       |
| пентахлорид            | MoCl <sub>5</sub>                   | 850 (3)                   | 5,3 (5)                     | 0,74 (3)                          | 369                                      | 3,9989                                               | 167,66                       |
| Мышьяка трихлорид      | AsCl <sub>3</sub>                   | 654,45 (50)               | —                           | 0,720                             | 252                                      | 1,5426                                               | 84,000                       |
| Никеля тетракарбонил   | Ni(CO) <sub>4</sub>                 | 473 (10)                  | 2,0 (5)                     | 0,5 (1)                           | 341                                      | 3,2196                                               | 242,57                       |

| Вещество                | Формула                          | $T_{\text{кр}}, \text{K}$ | $P_{\text{кр}}, \text{МПа}$ | $\rho_{\text{кр}}, \text{г/см}^3$ | $V_{\text{кр}}, \text{см}^3/\text{моль}$ | $a, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$ | $b, \text{см}^3/\text{моль}$ |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------|
| Ниобий:                 |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| пентабромид             | NbBr <sub>5</sub>                | 1009 (5)                  | —                           | 1,05 (4)                          | 469                                      | 4,4264                                               | 156,33                       |
| пентахлорид             | NbCl <sub>5</sub>                | 803,5 (2,0)               | 4,88 (11)                   | 0,68 (4)                          | 397                                      | 3,8551                                               | 170,98                       |
| пентафторид [20]        | NbF <sub>5</sub>                 | 737                       | 6,3                         | 1,21                              | 155                                      | 2,5215                                               | 121,92                       |
| Нитрозил:               |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| фтористый [12]          | NOF                              | 349,4 [20]                | 7,98                        | 0,595                             | 82,3                                     | 0,4459                                               | 45,478                       |
| хлористый               | NOC1                             | 440 [20]                  | 9,36 [21]                   | —                                 | —                                        | 0,6030                                               | 48,841                       |
| Нитронил фтористый      | NO <sub>2</sub> F                | 349,5 [12]                | 9,3 [12]                    | 0,602                             | 108                                      | 0,3821                                               | 38,964                       |
| Оксонитротрифторид [12] | NOF <sub>3</sub>                 | 302,65                    | 6,42                        | 0,593 [20]                        | 169 [20]                                 | 0,4158                                               | 48,962                       |
| Олова тетрахлорид       | SnCl <sub>4</sub>                | 591,85 (10)               | 3,744 (5)                   | 0,742 (5)                         | 351                                      | 2,7285                                               | 164,28                       |
| Перхлорилфторид         | FC1O <sub>3</sub>                | 368,65 (40)               | 5,4                         | 0,637                             | 161                                      | 0,7380                                               | 71,341                       |
| Рений:                  |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| оксид                   | Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>   | 942 (3)                   | 6,9 (3)                     | 1,45 (3)                          | 334                                      | 3,7558                                               | 142,08                       |
| оксохлорид              | ReO <sub>4</sub> Cl              | 782 (3)                   | 4,91 (25)                   | 0,95 (2)                          | 362                                      | 3,6289                                               | 165,37                       |
| Ртуть:                  |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| дибромид                | HgBr <sub>2</sub>                | 1011 (10)                 | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| диодид                  | HgI <sub>2</sub>                 | 1070 (10)                 | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| дихлорид                | HgCl <sub>2</sub>                | 972 (5)                   | 11,52 (40)                  | 1,555 (60)                        | 174,6                                    | 2,3916                                               | 87,682                       |
| Селена тетрафторид      | SeF <sub>4</sub>                 | 563 [12]                  | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| Селеноуглерод           | CSe <sub>2</sub>                 | 612 (20)                  | 7,0 (1,0)                   | 0,85 (8)                          | 200                                      | 1,5623                                               | 90,972                       |
| Сероуглерод             | CS <sub>2</sub>                  | 552 (1)                   | 7,90 (2)                    | 0,44 (1)                          | 173                                      | 1,1243                                               | 72,585                       |
| Сера:                   |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| гексафторид             | SF <sub>6</sub>                  | 318,70 (1)                | 3,759                       | 0,732                             | 199                                      | 0,7879                                               | 88,107                       |
| двуокись                | SO <sub>2</sub>                  | 430,65 (20)               | 7,88 (1)                    | 0,524 (5)                         | 122                                      | 0,6821                                               | 56,774                       |
| пентафторидхлорид       | SF <sub>5</sub> Cl               | 117,7 (2)                 | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| тетрафторид             | SF <sub>4</sub>                  | 364 [20]                  | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| трехокись               | SO <sub>3</sub>                  | 491,15 (50)               | 8,21 (5)                    | 0,633                             | 126                                      | 0,8571                                               | 62,192                       |
| трифторонитрид          | NSF <sub>3</sub>                 | 385                       | 6,9                         | 0,615                             | 167,5                                    | 0,6274                                               | 58,070                       |
| фторонитрид             | NF <sub>2</sub> ·SF <sub>5</sub> | 443,35 (30)               | 3,3                         | —                                 | —                                        | 1,7143                                               | 137,79                       |
| Силан:                  |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| бромид                  | SiH <sub>4</sub>                 | 270 (1)                   | 4,28 (15)                   | 0,309                             | 104 (10)                                 | 0,4972                                               | 65,623                       |
| дибромид                | SiH <sub>3</sub> Br              | 454 (10)                  | 5,64 (15)                   | 0,627                             | 177 (10)                                 | 1,0650                                               | 83,599                       |
| диодид                  | SiH <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> | 550 (10)                  | 5,30 (15)                   | 0,772                             | 246 (10)                                 | 1,6647                                               | 107,86                       |
| дифтордихлорид          | SiH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>  | 660 (10)                  | 6,68 (15)                   | 1,224                             | 232 (10)                                 | 1,8996                                               | 102,57                       |
| дихлорид                | SiF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 368,92 (2)                | 3,500 (5)                   | —                                 | —                                        | 1,1341                                               | 109,55                       |
| иодид                   | SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 470 (10)                  | 4,53 (15)                   | 0,515                             | 196 (10)                                 | 1,4223                                               | 107,84                       |
| тетрабромид             | SiH <sub>3</sub> I               | 515 (10)                  | 6,94 (15)                   | 0,988                             | 160 (10)                                 | 1,1144                                               | 77,112                       |
| тетраиодид              | SiBr <sub>4</sub>                | 656 (10)                  | 4,18 (15)                   | 0,872                             | 398 (10)                                 | 2,9989                                               | 162,91                       |
| тетрафторид             | SiI <sub>4</sub>                 | 850 (10)                  | 4,26 (15)                   | 1,417                             | 378 (10)                                 | 4,9393                                               | 207,08                       |
| тетрахлорид             | SiF <sub>4</sub>                 | 259,00 (2)                | 3,714 (5)                   | —                                 | —                                        | 0,5266                                               | 72,462                       |
| трибромид               | SiCl <sub>4</sub>                | 506 (10)                  | 3,75 (15)                   | 0,584                             | 291 (10)                                 | 1,9916                                               | 140,26                       |
| трииодид                | SiHBr <sub>3</sub>               | 610 (10)                  | 4,70 (15)                   | 0,768                             | 350 (10)                                 | 2,3081                                               | 134,84                       |
| трифторхлорид           | SiHCl <sub>3</sub>               | 760 (10)                  | 5,93 (15)                   | 1,326                             | 309 (10)                                 | 2,8417                                               | 133,25                       |
| трихлорид               | SiF <sub>3</sub> Cl              | 307,63 (2)                | 3,465 (5)                   | —                                 | —                                        | 0,7964                                               | 92,258                       |
| фтортрихлорид           | SiHCl <sub>3</sub>               | 495 (10)                  | 4,17 (15)                   | 0,533                             | 254 (10)                                 | 1,7117                                               | 123,23                       |
| хлорид                  | SiFCl <sub>3</sub>               | 438,41 (2)                | 3,600 (5)                   | —                                 | —                                        | 1,5569                                               | 126,56                       |
|                         | SiH <sub>3</sub> Cl              | 409 (10)                  | 4,81 (15)                   | 0,444                             | 150 (10)                                 | 1,0136                                               | 88,315                       |
| Сурьма:                 |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| трибромид               | SbBr <sub>3</sub>                | 904 [20]                  | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| трииодид [21]           | SbI <sub>3</sub>                 | 718,2                     | 0,23                        | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| трихлорид               | SbCl <sub>3</sub>                | 794,05 (50)               | —                           | 0,842                             | 271                                      | 2,0128                                               | 90,333                       |
| Тантал:                 |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| пентабромид             | TaBr <sub>5</sub>                | 973 (5)                   | —                           | 1,26 (3)                          | 461                                      | 4,1956                                               | 153,67                       |
| пентахлорид             | TaCl <sub>5</sub>                | 767 (3)                   | 4,3 (5)                     | 0,89 (3)                          | 401                                      | 3,9376                                               | 182,95                       |
| Титана тетрахлорид      | TiCl <sub>4</sub>                | 638 (3)                   | 4,7 [20]                    | 0,57 (2)                          | 336                                      | 2,5468                                               | 142,25                       |
| Углерод:                |                                  |                           |                             |                                   |                                          |                                                      |                              |
| двуокись                | CO <sub>2</sub>                  | 304,15 (5)                | 7,387 (5)                   | 0,468 (1)                         | 94                                       | 0,3652                                               | 42,792                       |
| окись                   | CO                               | 132,92 (3)                | 3,499 (5)                   | 0,301 (3)                         | 93                                       | 0,1473                                               | 39,482                       |
| селеноокись             | COSe                             | 394,25 (50)               | —                           | —                                 | —                                        | —                                                    | —                            |
| сероокись               | COS                              | 375,40 (10)               | 6,2 (1)                     | 0,44 [20]                         | 140 [20]                                 | 0,6649                                               | 63,120                       |
| Угольная кислота        | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   | 304,19                    | 7,380                       | 0,459                             | 135                                      | 0,3658                                               | 42,856                       |
| Урана гексафторид       | UF <sub>6</sub>                  | 504 (1)                   | 4,59 (6)                    | 1,39 (2)                          | 250 [20]                                 | 1,6139                                               | 114,11                       |
| Фосфин                  | PH <sub>3</sub>                  | 324,45 (20)               | 6,54 (4)                    | 0,30 [21]                         | 113,5 [21]                               | 0,4697                                               | 51,593                       |
| Фосфоний хлористый      | PH <sub>4</sub> Cl               | 322,25 (20)               | 7,37 (4)                    | —                                 | —                                        | 0,4111                                               | 45,463                       |

| Вещество           | Формула     | $T_{кр}, K$ | $P_{кр}, MPa$ | $\rho_{кр}, г/см^3$ | $V_{кр}, см^3/моль$ | $a, \frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b, см^3/моль$ |
|--------------------|-------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------|
| Фосфонитрилфторид: |             |             |               |                     |                     |                                 |                |
| тример             | $[PNF_2]_3$ | 460,85      | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| тетрамер           | $[PNF_2]_4$ | 496,35      | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| пентамер           | $[PNF_2]_5$ | 523,95      | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Фосфор:            |             |             |               |                     |                     |                                 |                |
| дифторхлорид       | $PF_2Cl$    | 362,32 (5)  | 4,520         | —                   | —                   | 0,8470                          | 83,303         |
| пентахлорид        | $PCl_5$     | 645,15 [22] | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| тридейтерид        | $PD_3$      | 323,6 [20]  | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| трифторид          | $PF_3$      | 271,10 (2)  | 4,325         | —                   | —                   | 0,4955                          | 65,134         |
| трихлорид          | $PCl_3$     | 563,15      | —             | 0,520               | 264                 | 1,3906                          | 88,000         |
| фтордихлорид       | $PFCl_2$    | 462,99 (5)  | 4,99          | —                   | —                   | 1,2514                          | 96,322         |
| Фтора оксид        | $F_2O$      | 215,5 (1)   | 4,96          | 0,553               | 97,6                | 0,2733                          | 45,200         |
| Фторимин           | $NHF_2$     | 403         | 9,4           | —                   | —                   | 0,5026                          | 44,445         |
| Хлор:              |             |             |               |                     |                     |                                 |                |
| оксид [12]         | $Cl_2O$     | 465         | 6,58          | 0,520               | 167                 | 0,9589                          | 73,487         |
| пентафторид [12]   | $ClF_5$     | 415,75      | 5,26          | 0,56 [20]           | 231                 | 0,9585                          | 82,161         |
| трифторид [12]     | $ClF_3$     | 447,5       | 5,8           | —                   | —                   | 1,0112                          | 80,523         |
| Цирконий:          |             |             |               |                     |                     |                                 |                |
| бромид             | $ZrBr_4$    | 805 (6)     | 4,3 (5)       | 0,97 (10)           | 420                 | 4,3374                          | 192,01         |
| иодид              | $ZrI_4$     | 959 (6)     | 4,1 (5)       | 1,13 (10)           | 530                 | 6,4560                          | 239,90         |
| хлорид             | $ZrCl_4$    | 778 (2)     | 5,91 (15)     | 0,73 (2)            | 319                 | 2,9881                          | 136,87         |

Таблица 13.6. Критические параметры и постоянные Ван-дер-Ваальса органических веществ.  
В круглых скобках указана погрешность приведенного значения, фр. — фреон

| Вещество                     | Формула        | $T_{кр}, K$ | $P_{кр}, MPa$ | $\rho_{кр}, г/см^3$ | $V_{кр}, см^3/моль$ | $a, \frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b, см^3/моль$ |
|------------------------------|----------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------|
| Углеводороды [23]            |                |             |               |                     |                     |                                 |                |
| Амилбензол [21]              | $C_{11}H_{16}$ | 678,9       | 2,65          | 0,284               | —                   | 5,0629                          | 265,77         |
| Бензол                       | $C_6H_6$       | 562,6 [24]  | 4,92 [24]     | 0,304 [24]          | 259                 | 1,8744                          | 118,73         |
| 1,3-Бутадиен (дивинил)       | $C_4H_6$       | 425         | 4,33          | 0,245               | 221                 | 1,2175                          | 102,08         |
| n-Бутан                      | $C_4H_{10}$    | 425,16      | 3,797         | 0,228               | 255                 | 1,3884                          | 116,38         |
| 1-Бутен                      | $C_4H_8$       | 419,6       | 4,02          | 0,234               | 240                 | 1,2764                          | 108,40         |
| цис-2-Бутен                  | $C_4H_8$       | 435,55      | 4,20          | 0,240               | 234                 | 1,3156                          | 107,64         |
| транс-2-Бутен                | $C_4H_8$       | 428,61      | 4,10          | 0,236               | 238                 | 1,3055                          | 108,54         |
| n-Бутилбензол                | $C_{10}H_{14}$ | 660,4       | 2,887         | 0,270               | 497                 | 4,4058                          | 237,75         |
| втор-Бутилбензол [21]        | $C_{10}H_{14}$ | 645         | 2,72          | 0,264               | —                   | 4,4510                          | 245,93         |
| трет-Бутилбензол [21]        | $C_{10}H_{14}$ | 639,6       | 2,72          | 0,274               | —                   | 4,3768                          | 243,87         |
| 1-Бутин (этилацетат)         | $C_4H_6$       | 463,6       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| 2-Бутин (диметилацетат)      | $C_4H_6$       | 488,6       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| n-Гексадекан [24]            | $C_{16}H_{34}$ | 725,15      | 1,42          | 0,24                | 924                 | 10,810                          | 531,25         |
| 1,5-Гексадиен                | $C_6H_{10}$    | 507         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Гексаметилбензол             | $C_{12}H_{18}$ | 767         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| n-Гексан                     | $C_6H_{14}$    | 507,4       | 2,97          | 0,233               | 370                 | 2,5289                          | 177,62         |
| 1-Гексен                     | $C_6H_{12}$    | 503,98      | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| n-Гептадекан [24]            | $C_{17}H_{36}$ | 735,15      | 1,32          | 0,24                | 1001                | 11,965                          | 580,01         |
| n-Гептан                     | $C_7H_{16}$    | 540,2       | 2,735         | 0,232               | 432                 | 3,1107                          | 205,21         |
| 1-Гептен                     | $C_7H_{14}$    | 537,23      | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Дейтерометан [9]             | $CD_4$         | 189,2 (1)   | 4,66 (1)      | 0,205 (2)           | 97,7                | 0,22397                         | 42,1858        |
| цис-Декагидронафталин [21]   | $C_{10}H_{18}$ | 677         | 2,49          | 0,247               | —                   | 5,3621                          | 282,26         |
| транс-Декагидронафталин [21] | $C_{10}H_{18}$ | 664         | 2,61          | 0,254               | —                   | 4,9182                          | 263,97         |
| n-Декан [24]                 | $C_{10}H_{22}$ | 619,5       | 2,11          | 0,236               | 602                 | 5,3104                          | 305,48         |



| Вещество                           | Формула        | $T_{кр}, K$ | $P_{кр}, MPa$ | $\rho_{кр}, г/см^3$ | $V_{кр}, см^3/моль$ | $a, \frac{H \cdot M^4}{моль^2}$ | $b, см^3/моль$ |
|------------------------------------|----------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------|
| 2, 2-Диметилбутан                  | $C_6H_{14}$    | 489,35      | 3,08          | 0,240               | 359                 | 2,2671                          | 165,10         |
| 2, 3-Диметилбутан                  | $C_6H_{14}$    | 499,93      | 3,127         | 0,241               | 358                 | 2,3309                          | 166,16         |
| 2, 2-Диметилгексан                 | $C_8H_{18}$    | 549,80      | 2,529         | 0,239               | 478                 | 3,4856                          | 225,92         |
| 2, 3-Диметилгексан                 | $C_8H_{18}$    | 563,42      | 2,628         | 0,244               | 468                 | 3,5221                          | 222,77         |
| 2, 4-Диметилгексан                 | $C_8H_{18}$    | 553,45      | 2,556         | 0,242               | 472                 | 3,4942                          | 224,99         |
| 2, 5-Диметилгексан                 | $C_8H_{18}$    | 549,99      | 2,628         | 0,237               | 482                 | 3,4088                          | 220,87         |
| 3, 3-Диметилгексан                 | $C_8H_{18}$    | 561,95      | 2,654         | 0,258               | 443                 | 3,4703                          | 220,07         |
| 3, 4-Диметилгексан                 | $C_8H_{18}$    | 568,78      | 2,692         | 0,245               | 460                 | 3,5043                          | 219,56         |
| 2, 2-Диметилпентан                 | $C_7H_{16}$    | 520,44      | 2,773         | 0,241               | 416                 | 2,8486                          | 195,03         |
| 2, 3-Диметилпентан                 | $C_7H_{16}$    | 537,29      | 2,908         | 0,255               | 393                 | 2,89496                         | 192,01         |
| 2, 4-Диметилпентан                 | $C_7H_{16}$    | 519,73      | 2,737         | 0,240               | 418                 | 2,8783                          | 197,36         |
| 3, 3-Диметилпентан                 | $C_7H_{16}$    | 536,34      | 2,946         | 0,242               | 414                 | 2,8480                          | 189,23         |
| 2, 2-Диметилпропан (неопентан)     | $C_5H_{12}$    | 433,75      | 3,199         | 0,238               | 303                 | 1,7152                          | 140,92         |
| 1, 1-Диметилциклопентан [24]       | $C_7H_{14}$    | 550,15      | 3,5           | 0,28                | —                   | 2,4889                          | 161,22         |
| цис-1, 2-Диметилциклопентан [24]   | $C_7H_{14}$    | 565,15      | 3,4           | 0,27                | —                   | 2,7037                          | 170,48         |
| транс-1, 2-Диметилциклопентан [24] | $C_7H_{14}$    | 555,15      | 3,4           | 0,27                | —                   | 2,6089                          | 167,47         |
| цис-1, 3-Диметилциклопентан [24]   | $C_7H_{14}$    | 555,15      | 3,4           | 0,27                | —                   | 2,6089                          | 167,47         |
| транс-1, 3-Диметилциклопентан [24] | $C_7H_{14}$    | 555,15      | 3,5           | 0,28                | —                   | 2,5343                          | 162,68         |
| Дифенил                            | $C_{12}H_{10}$ | 789         | 3,8           | 0,307               | 502                 | 4,7150                          | 212,96         |
| 1, 2-Диэтилбензол                  | $C_{10}H_{14}$ | 662,8       | 2,96          | 0,279               | —                   | 4,3299                          | 232,81         |
| 1, 3-Диэтилбензол [21]             | $C_{10}H_{14}$ | 657,1       | 2,92          | 0,287               | —                   | 4,5035                          | 243,95         |
| 1, 4-Диэтилбензол                  | $C_{10}H_{14}$ | 657,88      | 2,803         | 0,281 [21]          | —                   | 4,5033                          | 243,95         |
| n-Додекан [24]                     | $C_{12}H_{26}$ | 659,15      | 1,81          | 0,237               | 718                 | 6,9856                          | 377,69         |
| Изобутилбензол                     | $C_{10}H_{14}$ | 640         | 3,1           | 0,274 [21]          | —                   | 3,8028                          | 211,75         |
| Изопропилбензол (кумол)            | $C_9H_{12}$    | 631,15      | 3,1           | 0,28                | —                   | 3,6984                          | 208,82         |
| орто-Ксилол [24]                   | $C_8H_{10}$    | 632,15      | 3,6           | 0,28                | 379                 | 3,1948                          | 180,10         |
| мета-Ксилол [24]                   | $C_8H_{10}$    | 616,97      | 3,541         | 0,282               | 370                 | 3,1346                          | 181,10         |
| пара-Ксилол [24]                   | $C_8H_{10}$    | 616,2       | 3,511         | 0,280               | 379                 | 3,1539                          | 182,40         |
| Метан [9]                          | $CH_4$         | 190,60 (5)  | 4,63 (1)      | 0,160 (2)           | 100                 | 0,2288                          | 42,777         |
| 2-Метилбутан (изопентан)           | $C_5H_{12}$    | 460,39      | 3,381         | 0,236               | 306                 | 1,8281                          | 141,50         |
| 2-Метил-1-бутен                    | $C_5H_{10}$    | 465         | 3,4           | —                   | —                   | 1,8304                          | 140,27         |
| 2-Метил-2-бутен                    | $C_5H_{10}$    | 470         | 3,4           | —                   | —                   | 1,8699                          | 141,78         |
| 2-Метилгексан                      | $C_7H_{16}$    | 530,31      | 3,038         | 0,238               | 421                 | 2,6998                          | 181,43         |
| 3-Метилгексан                      | $C_7H_{16}$    | 535,19      | 2,814         | 0,248               | 404                 | 2,9685                          | 197,67         |
| 2-Метилгептан                      | $C_8H_{18}$    | 595,57      | 2,485         | 0,234               | 488                 | 4,1634                          | 249,12         |
| 3-Метилгептан                      | $C_8H_{18}$    | 563,60      | 2,546         | 0,246               | 464                 | 3,6379                          | 230,03         |
| 4-Метилгептан                      | $C_8H_{18}$    | 561,67      | 2,542         | 0,240               | 467                 | 3,6188                          | 229,60         |
| 1-Метилнафталин                    | $C_{11}H_{10}$ | 772         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| 2-Метилнафталин                    | $C_{11}H_{10}$ | 761         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| 2-Метилпентан                      | $C_6H_{14}$    | 497,45      | 3,010         | 0,235               | 367                 | 2,3972                          | 171,73         |
| 3-Метилпентан                      | $C_6H_{14}$    | 504,4       | 3,124         | 0,235               | 367                 | 2,3751                          | 168,80         |
| 2-Метилпропан (изобутан)           | $C_4H_{10}$    | 408,13      | 3,648         | 0,221               | 263                 | 1,3317                          | 116,28         |
| 2-Метилпропен (изобутилен)         | $C_4H_8$       | 417,89      | 4,000         | 0,235               | 239                 | 1,2731                          | 108,56         |
| 2-Метил-3-этилпентан               | $C_8H_{18}$    | 567,02      | 2,700         | 0,258               | 443                 | 3,4722                          | 218,22         |
| 3-Метил-3-этилпентан               | $C_8H_{18}$    | 576,51      | 2,808         | 0,251               | 455                 | 3,4521                          | 213,39         |
| Метилциклогексан                   | $C_7H_{14}$    | 572,12      | 3,471         | 0,267               | 368                 | 2,7498                          | 171,28         |
| Метилциклопентан                   | $C_6H_{12}$    | 532,73      | 3,785         | 0,264               | 319                 | 2,1869                          | 146,29         |
| Нафталин                           | $C_{10}H_8$    | 748,4       | 4,051         | 0,31                | 410                 | 4,0321                          | 192,00         |
| n-Нонадекан [21]                   | $C_{19}H_{40}$ | 760         | 1,2           | 0,24                | 1118                | 13,853                          | 649,58         |
| n-Нонан [21]                       | $C_9H_{20}$    | 595,4       | 2,316         | 0,236               | 534                 | 4,4632                          | 267,14         |
| n-Октадекан [21]                   | $C_{18}H_{38}$ | 753,2       | 1,3           | 0,24                | 1059                | 12,560                          | 594,25         |
| n-Октан                            | $C_8H_{18}$    | 568,76      | 2,487         | 0,232               | 492                 | 3,7940                          | 237,72         |
| 1-Октен                            | $C_8H_{16}$    | 566,6       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| n-Пентадекан [21]                  | $C_{15}H_{32}$ | 710,6       | 1,596         | 0,24                | 888                 | 9,2274                          | 462,75         |
| n-Пентан                           | $C_5H_{12}$    | 469,9       | 3,369         | 0,237               | 304                 | 1,9113                          | 144,95         |
| 1-Пентен                           | $C_5H_{10}$    | 464,74      | 4,05          | —                   | —                   | 1,5541                          | 119,17         |

| Вещество                            | Формула        | $T_{кр}, K$ | $P_{кр}, MPa$ | $\rho_{кр}, г/см^3$ | $V_{кр}, см^3/моль$ | $a, \frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b, см^3/моль$ |
|-------------------------------------|----------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------|
| <i>цис</i> -2-Пентен                | $C_5H_{10}$    | 476         | 3,6           | —                   | —                   | 1,8114                          | 135,61         |
| <i>транс</i> -2-Пентен              | $C_5H_{10}$    | 475         | 3,6           | —                   | —                   | 1,8038                          | 135,33         |
| 1-Пентин (пропилацетилен)           | $C_5H_8$       | 493,4       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Пропадиеп (аллен) [24]              | $C_3H_4$       | 393,85      | 5,25          | —                   | —                   | 0,8619                          | 77,984         |
| Пропан                              | $C_3H_8$       | 369,82      | 1,514         | 0,217               | 203                 | 2,6347                          | 253,89         |
| Пропен (пропилен)                   | $C_3H_6$       | 365,0       | 4,62          | 0,233               | 181                 | 0,8409                          | 82,098         |
| <i>n</i> -Пропилбензол              | $C_9H_{12}$    | 638,30      | 3,200         | 0,273               | 440                 | 3,7132                          | 207,31         |
| Пропин (метилацетилен)              | $C_3H_4$       | 402,38      | 5,526         | 0,245               | 164                 | 0,8544                          | 75,670         |
| <i>n</i> -Тетрадекан                | $C_{14}H_{30}$ | 695         | 1,678         | 0,24                | 826                 | 8,3949                          | 430,45         |
| 1, 2, 3, 4-Тетрагидронафталин [21]  | $C_{10}H_{12}$ | 719         | 3,52          | 0,309               | —                   | 4,2876                          | 212,52         |
| 1, 2, 3, 4-Тетраметилбензол [21]    | $C_{10}H_{14}$ | 700,1       | 3,27          | 0,308               | —                   | 4,3673                          | 222,31         |
| 1, 2, 3, 5-Тетраметилбензол [21]    | $C_{10}H_{14}$ | 686,8       | 3,21          | 0,308               | —                   | 4,2824                          | 222,21         |
| 1, 2, 4, 5-Тетраметилбензол (дурол) | $C_{10}H_{14}$ | 675         | 2,9           | 0,306 [21]          | —                   | 4,5219                          | 238,73         |
| 2, 2, 3, 3-Тетраметилбутан          | $C_8H_{18}$    | 567,8       | 2,87          | 0,248               | 461                 | 3,2788                          | 205,78         |
| 2, 2, 3, 3-Тетраметилгексан [25]    | $C_{10}H_{22}$ | 623         | 2,510         | —                   | —                   | 4,5098                          | 257,97         |
| 2, 2, 5, 5-Тетраметилгексан [25]    | $C_{10}H_{22}$ | 581,5       | 2,186         | —                   | —                   | 4,5119                          | 276,50         |
| 2, 2, 3, 3-Тетраметилгептан [25]    | $C_{11}H_{24}$ | 607,6       | 2,741         | —                   | —                   | 3,9280                          | 230,38         |
| 2, 2, 3, 4-Тетраметилгептан [25]    | $C_{11}H_{24}$ | 592,6       | 2,602         | —                   | —                   | 3,9358                          | 236,68         |
| 2, 2, 4, 4-Тетраметилгептан [25]    | $C_{11}H_{24}$ | 574,6       | 2,485         | —                   | —                   | 3,8754                          | 240,35         |
| 2, 3, 3, 4-Тетраметилгептан [25]    | $C_{11}H_{24}$ | 607,5       | 2,716         | —                   | —                   | 3,9634                          | 232,49         |
| Толуол (метилбензол)                | $C_7H_8$       | 591,72      | 4,109         | 0,292               | 316                 | 2,4851                          | 149,67         |
| <i>n</i> -Тридекан [21]             | $C_{13}H_{28}$ | 677,2       | 1,778         | 0,24                | 767                 | 7,5208                          | 395,77         |
| 1, 2, 3-Триметилбензол              | $C_9H_{12}$    | 664,45      | 3,454         | 0,28 [21]           | 430 [13]            | 3,7274                          | 199,91         |
| 1, 2, 4-Триметилбензол              | $C_9H_{12}$    | 649,05      | 3,232         | 0,28 [21]           | 430 [13]            | 3,8008                          | 208,68         |
| 1, 3, 5-Триметилбензол              | $C_9H_{12}$    | 637,28      | 3,121         | 0,28 [21]           | 430 [13]            | 3,7951                          | 212,22         |
| 2, 2, 3-Триметилбутан               | $C_7H_{16}$    | 531,11      | 2,954         | 0,252               | 398                 | 2,7851                          | 186,87         |
| 2, 2, 5-Триметилгексан              | $C_9H_{20}$    | 568,0       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| 3, 3, 5-Триметилгептан [25]         | $C_{10}H_{22}$ | 609,5       | 2,310         | —                   | —                   | 4,6894                          | 274,18         |
| 2, 2, 3-Триметилпентан              | $C_8H_{18}$    | 563,43      | 2,730         | 0,262               | 436                 | 3,3915                          | 214,51         |
| 2, 2, 4-Триметилпентан (изооктан)   | $C_8H_{18}$    | 543,89      | 2,568         | 0,244               | 408                 | 3,3599                          | 220,14         |
| 2, 3, 3-Триметилпентан              | $C_8H_{18}$    | 573,49      | 2,820         | 0,251               | 455                 | 3,4013                          | 211,36         |
| 2, 3, 4-Триметилпентан              | $C_8H_{18}$    | 566,34      | 2,730         | 0,248               | 461                 | 3,4266                          | 215,62         |
| <i>орто</i> -Трифенил               | $C_{18}H_{19}$ | 891,0       | 3,901         | 0,306               | 769                 | 5,9348                          | 237,37         |
| <i>мета</i> -Трифенил               | $C_{18}H_{19}$ | 924,8       | 3,506         | 0,300               | 784                 | 7,1142                          | 274,14         |
| <i>пара</i> -Трифенил               | $C_{18}H_{19}$ | 926,0       | 3,324         | 0,302               | 779                 | 7,5241                          | 289,56         |
| <i>n</i> -Уидекан [21]              | $C_{11}H_{24}$ | 642,6       | 1,958         | 0,237               | 659                 | 6,1515                          | 341,14         |
| Циклогексан                         | $C_6H_{12}$    | 553,4       | 4,07          | 0,273               | 308                 | 2,1926                          | 141,19         |
| Циклогексен                         | $C_6H_{10}$    | 560,41      | 4,24 [21]     | 0,288 [21]          | —                   | 2,1624                          | 137,50         |
| Циклогептан [26]                    | $C_7H_{14}$    | 604,3       | 3,81          | —                   | 353                 | 2,7952                          | 164,84         |
| Циклооктан [26]                     | $C_8H_{16}$    | 647,2       | 3,55          | —                   | 410                 | 3,4442                          | 189,66         |
| Циклопентан                         | $C_5H_{10}$    | 511,6       | 4,508         | 0,27                | 260                 | 1,6932                          | 117,92         |
| Циклопентен [21]                    | $C_5H_8$       | 504         | 4,55          | 0,277               | 251                 | 1,6282                          | 115,13         |
| Циклопропан                         | $C_3H_6$       | 397,80      | 5,495         | —                   | —                   | 0,8398                          | 75,236         |
| Цимол                               | $C_{10}H_{14}$ | 658 [13]    | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Эйкозан                             | $C_{20}H_{42}$ | 775         | 1,1           | 0,24                | 1176                | 15,715                          | 722,62         |
| Этан [9]                            | $C_2H_6$       | 305,45 (10) | 4,87 (1)      | 0,203 (5)           | 148                 | 0,5571                          | 64,997         |
| Этен (этилен) [9]                   | $C_2H_4$       | 282,36      | 5,066 (2)     | 0,227 (5)           | 124                 | 0,4589                          | 57,921         |
| Этилбензол                          | $C_8H_{10}$    | 617,09      | 3,609         | 0,284               | 374                 | 3,0769                          | 177,69         |
| 3-Этилгексан                        | $C_8H_{18}$    | 565,42      | 2,608         | 0,251               | 455                 | 3,5747                          | 225,30         |
| 3-Этилпентан                        | $C_7H_{16}$    | 540,57      | 2,891         | 0,241               | 416                 | 2,9479                          | 194,34         |
| <i>орто</i> -Этилтолуол [21]        | $C_9H_{12}$    | 653         | 3,1           | 0,28                | 430 [13]            | 3,9587                          | 216,05         |
| <i>мета</i> -Этилтолуол [21]        | $C_9H_{12}$    | 636         | 3,1           | 0,28                | 430 [13]            | 3,7553                          | 210,43         |

| Вещество                           | Формула           | $T_{кр}$ , К | $P_{кр}$ , МПа | $\rho_{кр}$ , г/см <sup>3</sup> | $V_{кр}$ , см <sup>3</sup> /моль | $a$ , $\frac{Н \cdot М^4}{МОЛЬ^2}$ | $b$ , см <sup>3</sup> /моль |
|------------------------------------|-------------------|--------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| <i>пара</i> -Этилтолуол [21]       | $C_9H_{12}$       | 636          | 3,1            | 0,28                            | 430 [13]                         | 3,7553                             | 210,43                      |
| Этилциклопентан                    | $C_7H_{14}$       | 569,45       | 3,398          | 0,262                           | 375                              | 2,7835                             | 174,19                      |
| Этин (ацетилен) [9]                | $C_2H_2$          | 308,33 (1)   | 6,24 (1)       | 0,232 (1)                       | 112                              | 0,4442                             | 51,338                      |
| Кислородсодержащие соединения [23] |                   |              |                |                                 |                                  |                                    |                             |
| Анизол (метилфениловый эфир)       | $C_7H_8O$         | 641          | 4,18           | —                               | —                                | 2,8703                             | 159,57                      |
| Ацетальдегид [9]                   | $C_2H_4O$         | 461(5)       | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Ацетон                             | $C_3H_6O$         | 508,2        | 4,70           | 0,278                           | 209                              | 1,6020                             | 112,34                      |
| Бензальдегид                       | $C_7H_6O$         | 625          | 2,18           | 0,330 [27]                      | —                                | 5,2291                             | 298,16                      |
| 1-Бутанол                          | $C_4H_{10}O$      | 562,93       | 4,413          | 0,270                           | 274                              | 2,0942                             | 132,58                      |
| 2-Бутанол                          | $C_4H_{10}O$      | 535,95       | 4,194          | 0,276                           | 268                              | 1,9974                             | 132,81                      |
| <i>трет</i> -Бутанол               | $C_4H_{10}O$      | 506,2        | 3,972          | 0,270                           | 275                              | 1,8813                             | 132,45                      |
| <i>n</i> -Бутилацетат              | $C_6H_{12}O_2$    | 579          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Валериановая кислота               | $C_4H_{10}O_2$    | 651          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Винилэтиловый спирт                | $C_4H_8O$         | 475          | 4,07           | —                               | —                                | 1,6154                             | 121,19                      |
| 1-Гексанол                         | $C_6H_{14}O$      | 610          | —              | 0,268                           | 381                              | 2,1739                             | 127,00                      |
| 1-Гептанол                         | $C_7H_{16}O$      | 633          | —              | 0,267                           | 435                              | 2,3980                             | 135,00                      |
| Дейтероуксусная кислота [9]        | $C_2H_3DO_2$      | 594,1 (1)    | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Дейтероэтанол [9]                  | $C_2H_5DO$        | 514,9 (1)    | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 1-Деканол                          | $C_{10}H_{22}O$   | 700          | —              | 0,264                           | 600                              | 3,9285                             | 200,00                      |
| Диизопропиловый эфир               | $C_6H_{12}O$      | 500          | 2,88           | 0,265                           | 386                              | 2,5336                             | 180,57                      |
| Диметилосалат                      | $C_4H_6O_4$       | 628          | 3,98           | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Диметоксиметан                     | $C_3H_8O_2$       | 497          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 1, 2-Диметоксиэтан                 | $C_4H_{10}O_2$    | 536          | 3,87           | 0,333                           | 271                              | 2,1646                             | 143,91                      |
| 1, 4-Диоксан                       | $C_4H_8O_2$       | 587          | 5,48           | 0,370                           | 238                              | 1,8331                             | 111,29                      |
| Дифениловый эфир [24]              | $C_{12}H_{10}O$   | 805,15       | 3,57           | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 1, 1-Диэтоксизтан (ацеталь)        | $C_6H_{14}O_2$    | 527          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изоамилацетат                      | $C_7H_{14}O_2$    | 509          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изобутанол                         | $C_4H_{10}O$      | 547,73       | 4,295          | 0,272                           | 273                              | 2,0369                             | 132,53                      |
| Изобутилацетат [21]                | $C_6H_{12}O_2$    | 561          | 3,1            | 0,281                           | —                                | 2,9218                             | 185,61                      |
| Изобутилбутират                    | $C_8H_{16}O_2$    | 611          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изобутилизобутират                 | $C_8H_{16}O_2$    | 602          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изобутилвалерат                    | $C_9H_{18}O_2$    | 621          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изобутилпропионат                  | $C_7H_{14}O_2$    | 592          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изобутилформиат                    | $C_5H_{10}O_2$    | 551          | 3,88           | 0,29                            | 350                              | 2,2815                             | 147,56                      |
| Изовалериановая кислота            | $C_4H_{10}O_2$    | 634          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изомасляная кислота                | $C_4H_8O_2$       | 609          | 4,05           | 0,302                           | 292                              | 2,6686                             | 156,16                      |
| Изопентилбутират                   | $C_9H_{18}O_2$    | 619          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изопентилпропионат                 | $C_8H_{16}O_2$    | 611          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изопентилформиат                   | $C_6H_{12}O_2$    | 578          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 2, 3-Ксиленол                      | $C_8H_{10}O$      | 722,8        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 2, 4-Ксиленол                      | $C_8H_{10}O$      | 707,6        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 2, 5-Ксиленол                      | $C_8H_{10}O$      | 723,0        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 2, 6-Ксиленол                      | $C_8H_{10}O$      | 701,0        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 3, 4-Ксиленол                      | $C_8H_{10}O$      | 729,8        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 3, 5-Ксиленол                      | $C_8H_{10}O$      | 715,6        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| <i>орто</i> -Крезол                | $C_7H_8O$         | 697,6        | 5,01           | 0,375 [21]                      | —                                | 2,8353                             | 144,84                      |
| <i>мета</i> -Крезол                | $C_7H_8O$         | 705,8        | 4,56           | 0,357 [21]                      | 310                              | 3,1861                             | 160,87                      |
| <i>пара</i> -Крезол                | $C_7H_8O$         | 704,6        | 5,15           | 0,347 [21]                      | —                                | 2,8127                             | 142,26                      |
| Масляная кислота                   | $C_4H_8O_2$       | 628          | 5,27           | 0,304                           | 290                              | 2,1828                             | 123,87                      |
| Метанол [9]                        | $CH_4O$           | 513,15 (30)  | 7,95 (5)       | 0,272 (5)                       | 118                              | 0,9654                             | 67,047                      |
| Метилацетат                        | $C_3H_6O_2$       | 506,8        | 4,69           | 0,325                           | 228                              | 1,5966                             | 112,27                      |
| 2-Метил-2-бутанол                  | $C_5H_{12}O_2$    | 545          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 3-Метил-1-бутанол                  | $C_5H_{12}O_2$    | 579,40       | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 3-Метил-2-бутанол                  | $C_5H_{12}O_2$    | 553,4        | 3,85           | 0,278                           | 310                              | 2,3195                             | 149,37                      |
| Метилбутират                       | $C_6H_{12}O_2$    | 554,4        | 3,48           | 0,300                           | 340                              | 2,5791                             | 165,78                      |
| Метилвалерат [21]                  | $C_6H_{12}O_2$    | 567          | 3,2            | 0,279                           | —                                | 2,8914                             | 181,73                      |
| Метилизобутират                    | $C_6H_{12}O_2$    | 540,8        | 3,44           | 0,301                           | 339                              | 2,4830                             | 163,62                      |
| Метиллаурат                        | $C_{13}H_{26}O_2$ | 712          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Метилловый (диметилловый) эфир     | $C_2H_6O$         | 400,05 (10)  | 5,37 (5)       | 0,238 (15)                      | 193                              | 0,8691                             | 77,418                      |

| Вещество                        | Формула           | $T_{кр}$ , К | $P_{кр}$ , МПа | $\rho_{кр}$ , г/см <sup>3</sup> | $V_{кр}$ , см <sup>3</sup> /моль | $a$ , $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b$ , см <sup>3</sup> /моль |
|---------------------------------|-------------------|--------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 4-Метил-2-пентанон              | $C_6H_{12}O$      | 571          | 3,27           | —                               | —                                | 2,9052                             | 181,32                      |
| Метилпропионат                  | $C_4H_8O_2$       | 530,6        | 4,004          | 0,312                           | 282                              | 2,0503                             | 137,71                      |
| 2-Метилтетрагидрофуран          | $C_5H_{10}O$      | 537          | 3,76           | 0,322                           | 267                              | 2,2371                             | 148,46                      |
| Метилформиат [9]                | $C_2H_4O_2$       | 487,15 (10)  | 5,998 (5)      | 0,349 (5)                       | 172                              | 1,1538                             | 84,400                      |
| 2-Метилфуран                    | $C_5H_6O$         | 527          | 4,72           | 0,333                           | 247                              | 1,7153                             | 115,99                      |
| Метилэтилкетон (бутанон)        | $C_4H_8O$         | 535,6        | 4,15           | 0,270                           | 267                              | 2,0138                             | 133,99                      |
| Метилэтиловый эфир              | $C_3H_8O$         | 437,8        | 4,40           | 0,272                           | 221                              | 1,27107                            | 103,46                      |
| 1-Нонанол                       | $C_9H_{20}O$      | 677          | —              | 0,264                           | 546                              | 3,4575                             | 182,00                      |
| 1-Октанол                       | $C_8H_{18}O$      | 658          | —              | 0,266                           | 490                              | 3,0158                             | 163,33                      |
| 2-Октанол                       | $C_8H_{18}O$      | 637          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Паральдегид                     | $C_6H_{12}O_3$    | 563          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 1-Пентанол                      | $C_5H_{12}O$      | 586          | —              | 0,270                           | 326                              | 1,7869                             | 108,67                      |
| 2-Пентанон                      | $C_5H_{10}O$      | 564          | 3,89           | 0,286                           | 301                              | 2,3842                             | 150,64                      |
| 3-Пентанон                      | $C_5H_{10}O$      | 561,0        | 3,74           | 0,256                           | 336                              | 2,4548                             | 155,93                      |
| n-Пентилформиат                 | $C_6H_{12}O_2$    | 576          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 1-Пропанол                      | $C_3H_8O$         | 536,71       | 5,170          | 0,275                           | 218                              | 1,6250                             | 107,90                      |
| 2-Пропанол                      | $C_3H_8O$         | 508,31       | 4,764          | 0,273                           | 220                              | 1,5816                             | 110,88                      |
| n-Пропилацетат                  | $C_5H_{10}O_2$    | 549,4        | 3,33           | 0,296                           | 345                              | 2,6405                             | 171,28                      |
| n-Пропилбутират                 | $C_7H_{14}O_2$    | 600          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| n-Пропилизобутират              | $C_7H_{14}O_2$    | 589          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| n-Пропилизопалерат              | $C_8H_{16}O_2$    | 609          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Пропилен окись                  | $C_3H_6O$         | 482,2        | 4,92           | 0,312                           | 186                              | 1,3769                             | 101,76                      |
| n-Пропилпропионат               | $C_6H_{12}O_2$    | 578          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Пропионовая кислота             | $C_3H_6O_2$       | 612          | 5,37           | 0,32                            | 230                              | 2,0339                             | 118,43                      |
| Пропилформиат                   | $C_4H_8O_2$       | 538,0        | 4,06           | 0,309                           | 285                              | 2,0774                             | 137,61                      |
| Тетрагидрофуран                 | $C_4H_8O$         | 540,2        | 5,19           | 0,322                           | 224                              | 1,6404                             | 108,22                      |
| Уксусная кислота [9]            | $C_2H_4O_2$       | 594,75 (10)  | 5,786 (5)      | 0,351 (50)                      | 171                              | 1,7829                             | 106,83                      |
| Уксусный ангидрид               | $C_4H_6O_3$       | 569          | 4,68           | —                               | —                                | 2,0169                             | 126,32                      |
| Фенетол (этоксипензол)          | $C_8H_{10}O$      | 647          | 3,42           | —                               | —                                | 3,5645                             | 196,33                      |
| Фенол                           | $C_6H_6O$         | 694,2        | 6,13           | 0,401 [21]                      | —                                | 2,2926                             | 117,69                      |
| Фуран                           | $C_4H_4O$         | 490,2        | 5,50           | 0,312                           | 218                              | 1,2737                             | 92,592                      |
| Циклогексано́л                  | $C_6H_{12}O_2$    | 625          | 3,75           | —                               | —                                | 3,0386                             | 173,25                      |
| Циклогексанон                   | $C_6H_{10}O$      | 629          | 3,85           | —                               | —                                | 2,9966                             | 169,77                      |
| Этанол [9]                      | $C_2H_6O$         | 516 (2)      | 6,4 (1)        | 0,276 (5)                       | 167                              | 1,2164                             | 84,006                      |
| Этилацетат                      | $C_4H_8O_2$       | 523,2        | 3,83           | 0,308                           | 286                              | 2,0843                             | 141,96                      |
| Этилбутират [21]                | $C_6H_{12}O_2$    | 566          | 3,0            | 0,276                           | 410                              | 3,0733                             | 193,51                      |
| Этилвалерат                     | $C_7H_{14}O_2$    | 570          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Этилена окись [9]               | $C_2H_4O$         | 468 (1)      | 7,19 (1)       | 0,32 (1)                        | 138                              | 0,8878                             | 67,607                      |
| Этилзобутират                   | $C_6H_{12}O_2$    | 553          | 3,0            | 0,28                            | 410                              | 2,9938                             | 189,06                      |
| Этилзопалерат                   | $C_7H_{14}O_2$    | 588          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Этиловый (диэтиловый) эфир      | $C_4H_{10}O$      | 466,70       | 3,638          | 0,265                           | 280                              | 1,7462                             | 133,33                      |
| Этилпропиловый эфир             | $C_5H_{12}O$      | 500,6 [21]   | 3,25           | 0,36                            | 240                              | 2,2469                             | 159,95                      |
| Этилпропионат                   | $C_5H_{10}O_2$    | 546          | 3,362          | 0,296                           | 345                              | 2,5859                             | 168,78                      |
| орто-Этилфенол                  | $C_8H_{10}O$      | 703,0        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| мета-Этилфенол                  | $C_8H_{10}O$      | 716,4        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| пара-Этилфенол                  | $C_8H_{10}O$      | 716,4        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Этилформиат                     | $C_3H_6O_2$       | 508,4        | 4,74           | 0,323                           | 229                              | 1,5895                             | 111,42                      |
| Этиловый эфир нонановой кислоты | $C_{11}H_{22}O_2$ | 674          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Этиловый эфир октановой кислоты | $C_{10}H_{20}O_2$ | 659          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |

## Галогеносодержащие соединения [23]

|                            |              |              |          |       |     |        |         |
|----------------------------|--------------|--------------|----------|-------|-----|--------|---------|
| Бензотрифторид [21]        | $C_7H_5F_3$  | 562,6        | 3,56     | 0,427 | 342 | 2,5954 | 164,40  |
| Бромбензол                 | $C_6H_5Br$   | 670          | 4,52     | 0,485 | 324 | 2,8968 | 154,08  |
| Бромметан [12]             | $CH_3Br$     | 464          | 6,94     | —     | 206 | 0,9045 | 69,475  |
| Бромтриодметан [9]         | $CBrl_3$     | 750          | —        | —     | —   | —      | —       |
| Бромэтан [9]               | $C_2H_5Br$   | 503,85 (1,5) | 6,23 (5) | 0,507 | 215 | 1,1881 | 84,029  |
| Гексафтороацетон           | $C_3F_6O$    | 357,2        | 2,84     | —     | —   | 1,3115 | 130,84  |
| Гексафтордихлорпропан [28] | $C_3F_6Cl_2$ | 449          | 2,99     | 0,62  | 356 | 2,0077 | 159,35  |
| Гексафторэтан              | $C_2F_6$     | 292,85 (50)  | 3,3      | 0,617 | 224 | 0,7479 | 91,0196 |

| Вещество                                  | Формула        | $T_{кр}, K$  | $P_{кр}, MPa$ | $\rho_{кр}, г/см^3$ | $V_{кр}, см^3/моль$ | $a, \frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b, см^3/моль$ |
|-------------------------------------------|----------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------|
| орто-Дибромбензол [21]                    | $C_6H_4Br_2$   | 761,75       | 4,22          | 0,645               | —                   | 4,0144                          | 187,81         |
| Дибромметан [28]                          | $CH_2Br_2$     | 583          | 7,2           | 0,525               | 165                 | 1,3778                          | 84,219         |
| 1,1-Дибромэтилен [9]                      | $C_2H_2Br_2$   | 582,95 (1,5) | 7,15 (8)      | —                   | —                   | 1,3854                          | 84,689         |
| Диодметан [34]                            | $CH_2I_2$      | 605,7        | 6,47          | 0,840               | —                   | —                               | —              |
| Дифторбромметан [9, 34]                   | $CHF_2Br$      | 409          | 5,18          | 0,750               | —                   | —                               | —              |
| Дифтордибромметан [9]                     | $CF_2Br_2$     | 464          | 4,22          | 0,866 [34]          | —                   | 1,4867                          | 114,18         |
| Дифтордиодметан [9]                       | $CF_2I_2$      | 477          | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Дифтордихлорметан (фреон-12) [9]          | $CF_2Cl_2$     | 384,65 (20)  | 4,01 (1)      | 0,555 (5)           | 218                 | 1,0753                          | 99,626         |
| Дифториодметан [9]                        | $CHF_2I$       | 459          | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Дифторметан [9]                           | $CH_2F_2$      | 351,55 (20)  | 5,83 (5)      | 0,430 (50)          | 120                 | 0,6182                          | 62,664         |
| 1, 2-Дифтор-1, 1, 2, 2-тетрахлорэтан [34] | $C_2F_2Cl_4$   | 551          | 3,33          | 0,569               | —                   | —                               | —              |
| Дифторхлорбромметан [28]                  | $CF_2ClBr$     | 428          | 4,310         | 0,741 [34]          | 245,7 [12]          | 1,2396                          | 103,22         |
| Дифторхлорметан (фреон-22) [9]            | $CHF_2Cl$      | 369,55 (50)  | 4,91 (5)      | 0,525 (10)          | 165                 | 0,8104                          | 78,151         |
| 1, 1-Дифтор-2-хлорэтилен [9]              | $C_2HF_2Cl$    | 400,6 (5)    | 4,46 (7)      | 0,499 (10)          | 197                 | 1,0497                          | 93,382         |
| 1, 1-Дифтор-1-хлорэтан [9]                | $C_2H_3F_2Cl$  | 410,25 (50)  | 4,12 (7)      | 0,435 (10)          | 231                 | 1,1902                          | 103,38         |
| 1, 1-Дифторэтан [9]                       | $C_2H_4F_2$    | 386,65 (70)  | 4,49 (7)      | 0,365 (10)          | 181                 | 0,9713                          | 89,519         |
| 1, 1-Дифторэтилен [9]                     | $C_2H_2F_2$    | 302,85 (2)   | 4,46 (1)      | 0,414 (2)           | 155                 | 0,5993                          | 70,515         |
| орто-Дихлорбензол [21]                    | $C_6H_4Cl_2$   | 697 [28]     | 4,10          | 0,408               | 360                 | 3,4522                          | 176,51         |
| мета-Дихлорбензол [21]                    | $C_6H_4Cl_2$   | 684          | 3,88          | 0,415               | —                   | 3,5156                          | 183,17         |
| пара-Дихлорбензол [21]                    | $C_6H_4Cl_2$   | 684,75       | 3,90          | 0,395               | —                   | 3,5050                          | 182,42         |
| Дихлорбромметан [34]                      | $CHCl_2Br$     | 585,43       | 5,60          | 0,712               | —                   | —                               | —              |
| Дихлордибромметан [34]                    | $CCl_2Br_2$    | 668,21       | 4,84          | 0,793               | —                   | —                               | —              |
| Дихлорметан [9]                           | $CH_2Cl_2$     | 510 (2)      | 6,1 (1)       | 0,472 (25)          | 180                 | 1,2477                          | 87,181         |
| 1, 1-Дихлорэтан [9]                       | $C_2H_4Cl_2$   | 523 (5)      | 5,1 (3)       | 0,308               | 321                 | 1,5745                          | 107,28         |
| 1, 2-Дихлорэтан [9]                       | $C_2H_4Cl_2$   | 561 (2)      | 5,4 (3)       | 0,44 (3)            | 225                 | 1,7091                          | 108,56         |
| 1, 1-Дихлорэтилен [12]                    | $C_2H_2Cl_2$   | 494,15       | 5,23          | —                   | 220,3               | 1,3619                          | 98,223         |
| цис-1, 2-Дихлорэтилен [12]                | $C_2H_2Cl_2$   | 544,15       | 5,86          | —                   | 220,3               | 1,4743                          | 96,559         |
| транс-1, 2-Дихлорэтилен [9]               | $C_2H_2Cl_2$   | 516,5        | 5,52          | —                   | 220,3 [12]          | 1,4088                          | 97,202         |
| Иодбензол                                 | $C_6H_5I$      | 721          | 4,52          | 0,581               | 351                 | 3,3546                          | 165,81         |
| Иодметан [9]                              | $CH_3I$        | 528          | —             | 0,83                | 171                 | 0,8445                          | 57,000         |
| Пентафторбензол                           | $C_6HF_5$      | 532,0        | 3,52          | —                   | —                   | 2,3475                          | 157,25         |
| 1Н-Пентадекафторгептан                    | $C_7HF_{15}$   | 495,8        | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Пентафторбромбензол                       | $C_6F_5Br$     | 670          | 4,52          | —                   | —                   | 2,8968                          | 154,08         |
| 1, 1, 2-Пентафторпропан                   | $C_3H_3F_5$    | 380,11       | 3,137         | 0,491               | 273                 | 1,3431                          | 125,92         |
| Пентафторхлорацетон                       | $C_3F_5ClO$    | 410,6        | 2,88          | —                   | —                   | 1,7086                          | 144,29         |
| Пентафторхлорбензол                       | $C_6F_5Cl$     | 571,0        | 3,22          | —                   | —                   | 2,9509                          | 184,17         |
| Пентафторхлорэтан (фреон-115) [9]         | $C_2F_5Cl$     | 353,1 (1)    | 3,157 (51)    | 0,613 (4)           | 252                 | 1,1516                          | 116,22         |
| Перфторбензол                             | $C_6F_6$       | 516,72       | 3,304         | 0,493 [29]          | —                   | 2,3565                          | 162,52         |
| Перфтор-н-бутан                           | $C_4F_{10}$    | 386,4        | 2,323         | 0,629               | 378                 | 1,8740                          | 172,84         |
| Перфтор-2-бутилтетрагидрофуран            | $C_8F_{16}O$   | 500,2        | 1,607         | 0,707               | 588                 | 4,5404                          | 323,48         |
| Перфтор-н-гексан                          | $C_6F_{14}$    | 447,6        | 1,905         | —                   | —                   | 3,0671                          | 244,19         |
| Перфтор-1-гексен                          | $C_6F_{12}$    | 454,4        | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Перфтор-н-гептан                          | $C_7F_{16}$    | 474,8        | 1,62          | 0,584               | 664                 | 4,0552                          | 304,36         |
| Перфтор-1-гептен                          | $C_7F_{14}$    | 478,2        | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Перфтор-н-декан                           | $C_{10}F_{22}$ | 542          | 1,45          | —                   | —                   | 5,9125                          | 388,75         |
| Перфторметилциклогексан                   | $C_6F_{12}$    | 488,6        | 2,3           | —                   | —                   | 2,9872                          | 217,88         |
| Перфторнафталин                           | $C_{10}F_8$    | 673,0        | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Перфтор-н-нонан                           | $C_9F_{20}$    | 524          | 1,56          | —                   | —                   | 5,1316                          | 348,99         |
| Перфтор-н-октан                           | $C_8F_{18}$    | 502          | 1,66          | —                   | —                   | 4,4225                          | 313,95         |
| Перфтор-н-пентан                          | $C_5F_{12}$    | 422          | 2,04          | —                   | 475 [30]            | 2,5500                          | 215,34         |
| Перфтор-н-пропан                          | $C_3F_8$       | 345,0        | 2,680         | 0,628               | 299                 | 1,2952                          | 133,78         |
| Перфторпропилен                           | $C_3F_6$       | 358          | 3,36          | 0,6 [31]            | —                   | 1,1110                          | 110,60         |
| Перфторциклобутан                         | $C_4F_8$       | 388,37       | 2,777         | 0,616               | 325                 | 1,5838                          | 145,32         |
| Перфторциклогексан                        | $C_6F_{12}$    | 457,2        | 2,4           | —                   | —                   | 2,5067                          | 195,39         |
| Перфторциклогексен                        | $C_6F_{10}$    | 461,8        | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Тетрафтордихлорэтан [24]                  | $C_2F_4Cl_2$   | 418,95       | 3,38          | 0,583               | —                   | 1,5125                          | 128,65         |
| 1, 1, 2, 2-Тетрафтор-1, 2-дихлорэтан      | $C_2F_4Cl_2$   | 418,8        | 3,26          | 0,582               | 294                 | 1,5677                          | 133,40         |

| Вещество                                 | Формула      | $T_{кр}, K$ | $P_{кр}, MPa$ | $\rho_{кр}, г/см^3$ | $V_{кр}, см^3/моль$ | $a, \frac{H \cdot M^4}{моль^2}$ | $b, см^3/моль$ |
|------------------------------------------|--------------|-------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------|
| 1, 2, 2, 2-Тетрафтор-1, 1-дихлорэтан [9] | $C_2F_4Cl_2$ | 418,65 (5)  | 3,30 (7)      | 0,582 (10)          | 294                 | 1,5474                          | 131,72         |
| Тетрафторэтилен [9]                      | $C_2F_4$     | 306 (1)     | 3,95 (10)     | 0,58 (1)            | 172                 | 0,6910                          | 80,475         |
| Тетрахлорацетилен [9]                    | $C_2H_2Cl_4$ | 642 (10)    | 3,95 (30)     | 0,503 (15)          | 334                 | 3,0417                          | 168,84         |
| Тетрахлорэтилен [12]                     | $C_2Cl_4$    | 613,2       | 4,48          | —                   | 289                 | 2,4483                          | 144,29         |
| Трибромметан [34]                        | $CHBr_3$     | 684,94      | 5,91          | 0,989               | —                   | —                               | —              |
| ИН-Тридекафторгексан                     | $C_6HF_{13}$ | 471,8       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Триодметан [9]                           | $CHI_3$      | 690         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Трифторбромметан                         | $CF_3Br$     | 340         | 3,97          | 0,76                | 200                 | 0,8488                          | 88,960         |
| Трифторидметан [9]                       | $CF_3I$      | 359         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Триформетан (фреон-23) [9]               | $CHF_3$      | 299,05 (50) | 4,86 (10)     | 0,525 (10)          | 133                 | 0,5362                          | 63,901         |
| Трифторпропилен [31]                     | $C_3H_3F_3$  | 376         | 3,92          | 0,455               | —                   | 1,0514                          | 99,651         |
| 1, 1, 2-Трифтор-1, 2, 2-трихлорэтан [9]  | $C_2F_3Cl_3$ | 487,25 (50) | 3,415 (20)    | 0,576 (10)          | 325                 | 2,0276                          | 148,29         |
| Трифторуксусная кислота                  | $C_2HF_3O_2$ | 491,3       | 3,258         | 0,559               | 204                 | 2,1608                          | 156,74         |
| Трихлорхлорметан [9]                     | $CF_3Cl$     | 301,95 (20) | 3,95 (5)      | 0,58 (1)            | 180                 | 0,6728                          | 76,410         |
| Трихлорхлорэтилен [9]                    | $C_2F_3Cl$   | 379 (1)     | 4,05 (10)     | 0,55 (1)            | 212                 | 1,0335                          | 97,181         |
| 1, 1, 1-Трифторэтан (фреон-143) [9]      | $C_2H_3F_3$  | 346,25 (50) | 3,76 (7)      | 0,434 (10)          | 193                 | 0,9301                          | 95,723         |
| 1, 2, 4-Трихлорбензол [28]               | $C_6H_3Cl_3$ | 735,0       | 3,98          | 0,472               | 384                 | 3,9563                          | 191,82         |
| Трихлорбромметан [34]                    | $CCl_3Br$    | 602,46      | 4,693         | 0,697               | —                   | —                               | —              |
| Трихлоридметан [9]                       | $CCl_3I$     | 607         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| 1, 1, 1-Трихлорэтан [9]                  | $C_2H_3Cl_3$ | 550 (10)    | 4,46 (30)     | 0,464 (15)          | 288                 | 1,9787                          | 128,21         |
| Трихлорэтилен [12]                       | $C_2HCl_3$   | 571,15      | 4,89          | —                   | 256,1               | 1,9438                          | 121,28         |
| Углерод:                                 |              |             |               |                     |                     |                                 |                |
| четырёхбромистый                         | $CBr_4$      | 715 [9]     | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| четырёхиодистый                          | $CI_4$       | 740 [9]     | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| четырёхфтористый (фреон-14)              | $CF_4$       | 227,7       | 3,745         | 0,647               | 136                 | 0,4044                          | 63,291         |
| четырёххлористый [9]                     | $CCl_4$      | 556,25 (50) | 4,56 (2)      | 0,558 (10)          | 276                 | 1,9789                          | 126,78         |
| ИН-Ундекафторпентан                      | $C_5HF_{11}$ | 444,0       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| ИН-Ундекафторциклогексан                 | $C_6HF_{11}$ | 477,6       | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Фосген [9]                               | $CCl_2O$     | 455 (1)     | 5,67 (10)     | 0,52 (1)            | 190                 | 1,0640                          | 83,335         |
| Фторбензол                               | $C_6H_5F$    | 560,09      | 4,551         | 0,269               | 357                 | 2,0104                          | 127,91         |
| Фторбромметан [34]                       | $CH_2FBr$    | 468         | 6,11          | 0,674               | —                   | —                               | —              |
| Фтордибромметан [34]                     | $CH_2FBr_2$  | 543,5       | 5,49          | 0,880               | —                   | —                               | —              |
| Фтордихлорбромметан [9]                  | $CFCl_2Br$   | 520         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Фтордихлорметан (фреон-21) [9]           | $CH_2Cl_2$   | 451,65 (50) | 5,17 (10)     | 0,522 (10)          | 197                 | 1,1512                          | 90,831         |
| Форметан [9]                             | $CH_3F$      | 317,75 (50) | 5,88 (5)      | 0,300 (5)           | 113                 | 0,5010                          | 56,190         |
| Фтортрибромметан [9]                     | $CFBr_3$     | 591         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Фтортрихлорметан (фреон-11) [9]          | $CFCl_3$     | 471,15 (50) | 4,38 (5)      | 0,554 (10)          | 248                 | 1,4789                          | 111,86         |
| Фторхлорбромметан [34]                   | $CH_2ClBr$   | 507,5       | 5,35          | 0,707               | —                   | —                               | —              |
| Фторхлордибромметан [9]                  | $CFClBr_2$   | 570         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Фторхлорметан [34]                       | $CH_2Cl_2$   | 424,83      | 6,00          | 0,443               | —                   | —                               | —              |
| 1-Фтор-2-хлорэтан [9]                    | $C_2H_4FCI$  | 520 (15)    | 5,37 (30)     | 0,40 (2)            | 207                 | 1,4684                          | 100,63         |
| Фторэтан [9]                             | $C_2H_5F$    | 375,31 (50) | 4,72 (5)      | —                   | —                   | 0,8700                          | 82,605         |
| Фторэтен (винилфторид)                   | $C_2H_3F$    | 327,8       | 5,24          | 0,320               | 144                 | 0,5982                          | 65,031         |
| Хлорбензол                               | $C_6H_5Cl$   | 632,4       | 4,52          | 0,365               | 308                 | 2,5808                          | 145,43         |
| Хлорбромметан [34]                       | $CH_2ClBr$   | 555,5       | 6,32          | 0,669               | —                   | —                               | —              |
| Хлордибромметан [34]                     | $CHClBr_2$   | 654,4       | 5,75          | 0,83                | —                   | —                               | —              |
| Хлорметан (фреон-40) [9]                 | $CH_3Cl$     | 416,25 (10) | 6,60 (1)      | 0,353 (10)          | 143                 | 0,7660                          | 65,581         |
| Хлороформ [9]                            | $CHCl_3$     | 536,55 (50) | 5,47 (20)     | 0,50 (3)            | 239                 | 1,5344                          | 101,91         |
| дейтерированный [9]                      | $CDCl_3$     | 535,9 (1)   | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Хлорпропан                               | $C_3H_7Cl$   | 503         | 4,58          | —                   | —                   | 1,6110                          | 114,14         |
| 3-Хлорпропен                             | $C_3H_5Cl$   | 514         | —             | —                   | —                   | —                               | —              |
| Хлортрибромметан [34]                    | $CClBr_3$    | 674,67      | 5,02          | 0,968               | —                   | —                               | —              |
| Хлорэтан [9]                             | $C_2H_5Cl$   | 460,35 (50) | 5,27 (5)      | 0,331               | 195                 | 1,1729                          | 90,800         |
| Азотсодержащие соединения [23]           |              |             |               |                     |                     |                                 |                |
| Анилин                                   | $C_6H_5N$    | 699         | 5,31          | 0,34                | 270                 | 2,6837                          | 136,82         |
| Ацетонитрил                              | $C_3H_3N$    | 548         | 4,80          | 0,237               | 173                 | 1,8120                          | 117,83         |
| Бензонитрил                              | $C_7H_5N$    | 690,4       | 4,22          | —                   | —                   | 3,2977                          | 170,22         |

| Вещество                                            | Формула         | $T_{кр}$ , К | $P_{кр}$ , МПа | $\rho_{кр}$ , г/см <sup>3</sup> | $V_{кр}$ , см <sup>3</sup> /моль | $a$ , $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$ | $b$ , см <sup>3</sup> /моль |
|-----------------------------------------------------|-----------------|--------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| <i>n</i> -Бутиламин                                 | $C_4H_9N$       | 524          | 4,15           | —                               | —                                | 1,9275                             | 131,08                      |
| Бутиронитрил                                        | $C_4H_7N$       | 582,2        | 3,79           | —                               | —                                | 2,6084                             | 159,67                      |
| Диметиламин [9]                                     | $C_2H_7N$       | 437,65 (50)  | 5,31 (5)       | —                               | —                                | 1,0520                             | 85,664                      |
| <i>N</i> , <i>N</i> -Диметиланилин                  | $C_8H_{11}N$    | 687          | 3,63           | —                               | —                                | 3,7944                             | 196,82                      |
| <i>N</i> , <i>N</i> -Диметил- <i>орто</i> -толуидин | $C_9H_{14}N$    | 668          | 3,12           | —                               | —                                | 4,1698                             | 222,45                      |
| Ди- <i>n</i> -пропиламин                            | $C_6H_{15}N$    | 550          | 3,1            | 0,24                            | 300                              | 2,8085                             | 181,97                      |
| Диэтиламин [9]                                      | $C_4H_{11}N$    | 496,35 (50)  | 3,71 (5)       | —                               | —                                | 1,9373                             | 139,09                      |
| Изоксазол                                           | $C_3H_3NO$      | 552,0        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Изохинолин                                          | $C_8H_9N$       | 803          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Капронитрил                                         | $C_{10}H_{19}N$ | 622,0        | 3,25           | —                               | —                                | 3,4688                             | 198,74                      |
| 2, 3-Лутидин                                        | $C_7H_9N$       | 655,4        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 2, 4-Лутидин                                        | $C_7H_9N$       | 647          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 2, 5-Лутидин                                        | $C_7H_9N$       | 644,2        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 2, 6-Лутидин                                        | $C_7H_9N$       | 623,8        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 3, 4-Лутидин                                        | $C_7H_9N$       | 683,8        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| 3, 5-Лутидин                                        | $C_7H_9N$       | 667,2        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Метиламин [9]                                       | $CH_5N$         | 430,05 (50)  | 7,46 (5)       | 0,223 [28]                      | 254 [28]                         | 0,7232                             | 59,930                      |
| <i>N</i> -Метиланилин                               | $C_7H_9N$       | 701          | 5,20           | —                               | —                                | 2,7569                             | 140,15                      |
| Метилгидразин                                       | $CH_2N_2$       | 567          | 8,035          | 0,170                           | 271                              | 1,1668                             | 73,335                      |
| Нитродейтерометан [9]                               | $CD_3NO_2$      | 587,0        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Нитрометан [9]                                      | $CH_3NO_2$      | 588 (1)      | 6,31 (7)       | 0,352 (10)                      | 173                              | 1,5972                             | 96,804                      |
| $\alpha$ -Пиколин                                   | $C_6H_7N$       | 621          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| $\beta$ -Пиколин                                    | $C_6H_7N$       | 645          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| $\gamma$ -Пиколин                                   | $C_6H_7N$       | 646          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Пиперидин                                           | $C_5H_{11}N$    | 594,0        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Пиридин                                             | $C_5H_5N$       | 620,0        | 5,63           | 0,312                           | 254                              | 1,9898                             | 114,37                      |
| Пиррол                                              | $C_4H_5N$       | 639,8        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Пирролидин                                          | $C_4H_9N$       | 568,6        | 5,61           | 0,286                           | 249                              | 1,6796                             | 105,27                      |
| <i>n</i> -Пропиламин                                | $C_3H_7N$       | 497,0        | 4,74           | —                               | —                                | 1,5191                             | 108,92                      |
| Пропионитрил                                        | $C_3H_5N$       | 564,4        | 4,185          | 0,240                           | 230                              | 2,2199                             | 140,16                      |
| <i>орто</i> -Толуидин                               | $C_7H_9N$       | 693          | 3,75           | —                               | —                                | 3,7357                             | 192,10                      |
| <i>мета</i> -Толуидин                               | $C_7H_9N$       | 709          | 4,15           | —                               | —                                | 3,5287                             | 177,36                      |
| <i>пара</i> -Толуидин                               | $C_7H_9N$       | 667          | 2,38           | —                               | —                                | 5,4487                             | 291,11                      |
| Триметиламин [9]                                    | $C_3H_9N$       | 433,30 (10)  | 4,078 (5)      | 0,233 (3)                       | 254                              | 1,3428                             | 110,44                      |
| Триэтиламин [9]                                     | $C_6H_{15}N$    | 532 (10)     | 3,0 (5)        | 0,26                            | 390                              | 2,7152                             | 181,88                      |
| Хинолин                                             | $C_8H_7N$       | 782          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Этиламин [9]                                        | $C_2H_7N$       | 456,35 (50)  | 5,62 (5)       | 0,243                           | 185                              | 1,0800                             | 84,335                      |
| Этилендиамин [9]                                    | $C_2H_8N_2$     | 539 (5)      | 6,3 (3)        | 0,29 (1)                        | 206                              | 1,6324                             | 98,099                      |
| Серосодержащие соединения [23]                      |                 |              |                |                                 |                                  |                                    |                             |
| Диаллилсульфид                                      | $C_6H_{10}S$    | 653          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Диметилсульфид [9]                                  | $C_2H_6S$       | 503,05 (50)  | 5,53 (2)       | 0,309                           | 201                              | 1,3339                             | 94,498                      |
| Диэтилсульфид [9]                                   | $C_4H_{10}S$    | 556,95 (50)  | 3,96 (5)       | 0,279                           | 323                              | 2,2833                             | 146,10                      |
| Изопентилсульфид                                    | $C_{10}H_{22}S$ | 664          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Метилмеркаптан                                      | $CH_4S$         | 470,0        | 7,24           | 0,332                           | 145                              | 0,8904                             | 67,515                      |
| Метилэтилсульфид                                    | $C_3H_8S$       | 553          | 4,26           | —                               | —                                | 2,0956                             | 135,04                      |
| Тетрагидротиофен                                    | $C_4H_8S$       | 632,0        | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Тиофен                                              | $C_4H_4S$       | 579,4        | 5,695          | 0,385                           | 219                              | 1,7192                             | 105,74                      |
| Этилдисульфид                                       | $C_4H_{10}S_2$  | 642          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Этилмеркаптан [9]                                   | $C_2H_6S$       | 498,65 (50)  | 5,49 (5)       | 0,300                           | 207                              | 1,3204                             | 94,362                      |
| Кремнийорганические соединения [32]                 |                 |              |                |                                 |                                  |                                    |                             |
| Диметилдихлорсилан                                  | $C_2H_6Cl_2Si$  | 520,35       | 3,49           | 0,369                           | —                                | 2,2654                             | 155,14                      |
| Триметилдихлорсилан                                 | $C_3H_9ClSi$    | 497,75       | 3,20           | 0,297                           | —                                | 2,2565                             | 161,56                      |
| Триэтилхлорсилан                                    | $C_2H_5Cl_3Si$  | 559,95       | 3,33           | 0,406                           | —                                | 2,7429                             | 174,56                      |
| Смеси [28]                                          |                 |              |                |                                 |                                  |                                    |                             |
| Даутерм (48% дибензила, 58% нафталина)              | —               | 801          | —              | —                               | —                                | —                                  | —                           |
| Даутерм (73,5% дифенилового эфира, 26,5% дифенила)  | —               | 801          | 4,15           | —                               | —                                | 4,5037                             | 200,38                      |

параметрами вещества) и при которых уравнение состояния вещества удовлетворяет условиям  $(\partial P/\partial V)_T=0$ ,  $(\partial^2 P/\partial V^2)_T=0$ . Состояние, соответствующее критическим параметрам, называется критическим состоянием или критической точкой вещества. По современным представлениям критическая точка является изолированной точкой фазового перехода второго рода и одновременно конечной точкой фазового перехода первого рода жидкость — пар [7, 8]. Критическая точка характеризуется рядом физических явлений (исчезновение мениска, так называемая критическая опалесценция, бесконечная сжимаемость, бесконечная теплоемкость при постоянном объеме и т. д.), которые протекают идентично во всех веществах и определяются самыми общими свойствами межмолекулярных сил. В табл. 13.4—13.6 приведены значения критических параметров простых веществ, неорганических и органических соединений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарков В. Н., Калинин В. А. Уравнение состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука. 1968.
2. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука. 1974.
3. Мейсон Э., Сперлинг Т. Вириальное уравнение состояния: Пер. с англ./Под ред. В. В. Сычева. М.: Мир. 1972.
4. Вукалович М. П., Новиков И. И. Уравнение состояния реальных газов. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1948.
5. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей: Пер. с польск./Под ред. П. Г. Романкова. М.—Л.: Химия. 1966.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко. — 2-е изд. М.: Изд-во АН СССР. 1962. Т. 1, 2.
7. Фишер М. Природа критического состояния: Пер. с англ. М.: Мир. 1968.
8. Уравнение состояния газов и жидкостей. М.: Наука, 1975.
9. Термические константы веществ/Под ред. В. П. Глушко. Вып. 1—10. М.: Наука. 1965—1982.
10. Ohse R. W., Tippelskirch H.//High. Temp.-High Press. 1977. Vol. 9, № 4. P. 367—385.
11. Herreman W.//Cryogenics. 1980. Vol. 2, № 3. P. 133—134.
12. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание. — 3-е изд./Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука. 1978—1982. Т. 1—4.
13. Kobe K. A., Lynn R. E.//Chem. Rev. 1953. Vol. 52, № 1. P. 117—236.
14. Мартынюк М. М., Каримходжаев И.//Журн. физ.-хим., 1974. Т. XLVIII. Вып. 5. С. 1243—1245.
15. Seydel U., Fucke W.//J. Phys. 1978. Vol. F8. P. L157—L161.
16. Goodwin R. D.//J. Res. NBS. 1970. Vol. 74A2. P. 221—227.
17. Rau H.//J. Chem. Thermod. 1974. Vol. 6, № 6. P. 525—535.
18. Rau H., Kutty T. R. N., Guedes de Carvalho J.//J. Chem. Thermod. 1973. Vol. 5, № 2. P. 291—302.
19. Hoshino H., Schmutzler R. W., Hensel F.//Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1976. Bd 8, № 1. S. 27—31.
20. Mathews J. F.//Chem. Revs. 1972. Vol. 72, № 1. P. 71—100.
21. Справочник химика. Т. 1/Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия. 1963.
22. Свойства неорганических соединений: Справочник/А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.
23. Kudchadker A. J., Alani G. H., Zwolinski B. J.//Chem. Rev. 1968. Vol. 68. P. 659—735.
24. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз. 1963.
25. Ambrose D., Townsend R.//Trans. Farad. Soc. 1968. Vol. 64, № 550, part. 10. P. 2622—2631.
26. Young C. L.//Austral. J. Chem. 1972. Vol. 25, № 8. P. 1625—1630.
27. Ambrose D. e. a. //J. Chem. Thermod. 1975. Vol. 7, № 12. P. 1143—1157.
28. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. — 1-е изд. М.: Атомиздат. 1976.
29. Redlich O., Kwong J. N. S. Chem. Rev. 1949. Vol. 44, № 1. P. 233—244.
30. Redlich O. Thermodynamics: Fundamentals, Application Elsevier. Amsterdam, 1976.
31. Beattie J. A., Bridgeman O. C.//J. Amer. Chem. Soc. 1927. Vol. 49, № 7. P. 1665—1667.
32. Benedict N., Webb G. B., Rubin L. C.//J. Chem. Phys. 1940. Vol. 8, № 4. P. 334—345.
33. Таблицы стандартных справочных данных. ГСССД 49—83. М.: Изд-во стандартов. 1984.
34. Перельштейн И. И., Парушин Е. Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1984.



# ГЛАВА 14

## ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Б. Д. Сумм

### 14.1. ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное натяжение представляет собой основную термодинамическую характеристику поверхностного слоя жидкостей и твердых тел на границе с различными фазами (газами, жидкостями, твердыми телами). Поверхностное натяжение обусловлено межмолекулярными (межатомными) взаимодействиями. Оно возникает потому, что на поверхности молекулы взаимодействуют не только с соседними молекулами данной фазы (как в ее объеме), но и с ближайшими молекулами соседней фазы.

Поверхностное натяжение  $\sigma$  имеет два определения [1, 2]:

энергетическое — удельная свободная поверхностная энергия, Дж/м<sup>2</sup>;

силовое — сила, которая обусловлена межмолекулярными взаимодействиями и действует на единицу длины контура, ограничивающего поверхность данной фазы, Н/м. Эта сила направлена тангенциально (по поверхности) и перпендикулярно ограничивающему контуру.

Для жидкостей оба определения совпадают. Для твердых тел они не эквивалентны.

Наряду с поверхностным натяжением  $\sigma$  в термодинамике используется понятие полной поверхностной энергии  $\epsilon = \sigma + \eta T$ , где  $\eta$  — поверхностная энтропия;  $\epsilon$  не зависит от температуры  $T$ .

Для многих однокомпонентных неассоциированных жидкостей (вода, органические вещества, расплавы солей, жидкие металлы) вдали от критической точки зависимость  $\sigma(T)$  близка к линейной:  $\sigma = \sigma_0 - a(T - T_0)$ , где  $\sigma_0$  — поверхностное натяжение при температуре  $T_0$ ; температурный коэффициент  $a \approx 0,1$  мДж/(м<sup>2</sup>·К) в достаточно широком интервале температур. При критической температуре  $\sigma = 0$ .

Поверхностное натяжение входит во многие уравнения физики, физической и коллоидной химии, электрохимии, оно определяет следующие величины [1—4].

1. Капиллярное давление  $P_K$  жидкости, Па, под искривленной поверхностью (уравнение Лапласа):

$$P_K = \sigma (1/r_1 + 1/r_2), \quad (1)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  — главные радиусы кривизны. Для выпуклой поверхности  $r > 0$ , для вогнутой  $r < 0$ . В случае сферической поверхности  $P_K = \pm 2\sigma/r$ , где  $r$  — радиус сферы.

2. Краевой угол смачивания  $\theta$ , образуемый жидкостью возле поверхности твердого тела (уравнение Юнга):

$$\cos \theta = (\sigma_T - \sigma_{ТЖ})/\sigma_{Ж}, \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  и  $\sigma_{Ж}$  — поверхностное натяжение твердого тела и жидкости на границе с окружающей средой;  $\sigma_{ТЖ}$  — поверхностное натяжение на границе твердое тело — жидкость;

3. Давление насыщенного пара  $P_r$ , Па, над искривленной поверхностью жидкости (уравнение Кельвина):

$$P_r = P_0 \exp(2\sigma V_m/rRT), \quad (3)$$

где  $V_m$  — молярный объем жидкости, м<sup>3</sup>/моль;  $P_0$  — давление пара над плоской поверхностью, Па;  $r$  — радиус кривизны, м;  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная;

4. Адсорбцию веществ, самопроизвольно концентрирующихся на поверхности раздела фаз (уравнение Гиббса):

$$\Gamma = -d\sigma/d\mu, \quad (4)$$

где  $\Gamma$  — удельная адсорбция (масса вещества, адсорбированного на единице площади, моль/м<sup>2</sup>);  $\mu$  — химический потенциал этого вещества в фазе, из которой оно адсорбируется, Дж/моль. В случае разбавленных растворов

$$\Gamma = (-d\sigma/dc) c/RT, \quad (4a)$$

где  $c$  — молярная концентрация раствора, моль/м<sup>3</sup>;

5. Состояние адсорбционного слоя поверхностно-активного вещества на поверхности жидкости (уравнение Фрумкина—Фольмера):

$$(\pi + a/A^2)(A - b) = kT, \quad (5)$$

где  $\pi = \sigma_0 - \sigma$  — двумерное (поверхностное) давление, Н/м;  $\sigma_0$  и  $\sigma$  — поверхностное натяжение чистой жидкости и жидкости при наличии адсорбционного слоя;  $a$  — константа (аналог константы Ван-дер-Ваальса), Дж·м<sup>2</sup>;  $A$  — площадь поверхностного слоя, приходящаяся на 1 молекулу адсорбированного вещества, м<sup>2</sup>;  $b$  — собственная площадь этой молекулы, м<sup>2</sup>;  $k$  — константа Больцмана, Дж/К;

6. Электрокапиллярный эффект (уравнение Липпмана):

$$-d\sigma/d\varphi = \rho_s, \quad (6)$$

где  $\rho_s$  — плотность поверхностного заряда, Кл/м<sup>2</sup>;  $\varphi$  — потенциал электрода, В;

7. Дифференциальную емкость двойного электрического слоя  $C$ , Ф:

$$C = d^2\sigma/d\varphi^2. \quad (7)$$

8. Равновесную форму (огранку) кристаллов (уравнение Гиббса—Кюри—Вульфа):

$$\sigma_1/h_1 = \sigma_2/h_2 = \dots = \sigma_i/h_i, \quad (8)$$

где  $\sigma_i$  — поверхностное натяжение грани кристалла;  $h_i$  — ее расстояние от центра кристалла;

9. Работу образования  $W_c$  критического зародыша при образовании новой фазы (уравнения Гиббса), Дж. При гомогенном образовании:

а) конденсация пара при давлении  $P$

$$W_c = 16\pi\sigma^3 V_m^2 / 3(RT \ln P/P_0)^2, \quad (9a)$$

где  $V_m$  — молярный объем жидкости, м<sup>3</sup>/моль;  $P_0$  — давление насыщенного пара над плоской поверхностью жидкости;  $P/P_0$  — относительное пересыщение;

б) кристаллизация из пересыщенного раствора концентрации  $c$

$$W_c = 16\pi\sigma^3 V_m^2 / (3RT \ln c/c_0)^2, \quad (9б)$$

где  $c_0$  — концентрация насыщенного (равновесного) раствора при данной температуре  $T$ ;

в) кристаллизация из расплава

$$W_c = 16\pi\sigma^3 (V_m T_{пл} / L\Delta T)^2, \quad (9в)$$

где  $T_{пл}$  — температура плавления;  $T_{пл} - T = \Delta T$  — переохлаждение;  $L$  — молярная теплота плавления, Дж/моль;

10. Идеальную (теоретическую)  $P_{ид}$  и реальную  $P_{рл}$ , Н/м<sup>2</sup>, прочности твердых тел (уравнения Поляни—Смекала и Гриффитса):

$$P_{ид} = (2\sigma_t E / \delta)^{1/2}, \quad (10a)$$

$$P_{рл} = (2\sigma_t E / \pi l)^{1/2}, \quad (10б)$$

где  $E$  — модуль Юнга, Н/м<sup>2</sup>;  $\delta$  — межмолекулярное (межатомное) расстояние;  $l$  — длина зародышевой трещины, которая при напряжении  $P_{рл}$  начинает самопроизвольно расти;

11. Длину капиллярных волн  $\lambda$  на поверхности жидкости (уравнение Кельвина):

$$\sigma = \lambda^3 \rho / 2\pi\tau^2 - g\lambda^2 \rho / 4\pi^2, \quad (11)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  — период колебаний, с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

12. Упругость жидких пленок со слоем поверхностно-активного вещества (уравнение Гиббса):

$$E_s = 2(d\sigma/d \ln s), \quad (12)$$

где  $E_s$  — модуль упругости пленки, Н/м;  $s$  — ее площадь, м<sup>2</sup>;

13. Число Бонда  $Bo$ , определяющее соотношение гравитационных и капиллярных сил:

$$Bo = (\rho' - \rho'') g l^2 / \sigma, \quad (13)$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  — плотность жидкости и окружающей среды;  $l$  — характерный размер, например диаметр сосуда;

14. Число Вебера  $We$ , определяющее отношение сил инерции к капиллярным силам:

$$We = \rho v^2 l / \sigma, \quad (14)$$

где  $v$  — скорость течения.

Поверхностное натяжение жидкостей измерено для многих чистых веществ и смесей (растворов, расплавов) в широком интервале температур, давлений, составов жидкости и для различной природы граничной фазы. Для твердых тел измерения  $\sigma_t$  и  $\sigma_{тж}$  сопряжены с большими трудностями. Одно из главных затруднений заключается в том, что работа образования новой поверхности твердого тела включает, как правило, дополнительные (необратимые) затраты на пластическую деформацию. Для измерения поверхностного натяжения жидкостей применяют различные методы [1, 2].

Необходимо подчеркнуть, что поверхностное натяжение большинства веществ очень чувствительно к наличию примесей в самой фазе и в граничной фазе. Поэтому измерения разных авторов даже одним методом обычно дают неодинаковые значения  $\sigma$  для одних и тех же веществ. При отборе данных для настоящего справочника в большинстве случаев использовались сведения последних публикаций.

## 14.2. СЖИЖЕННЫЕ ГАЗЫ

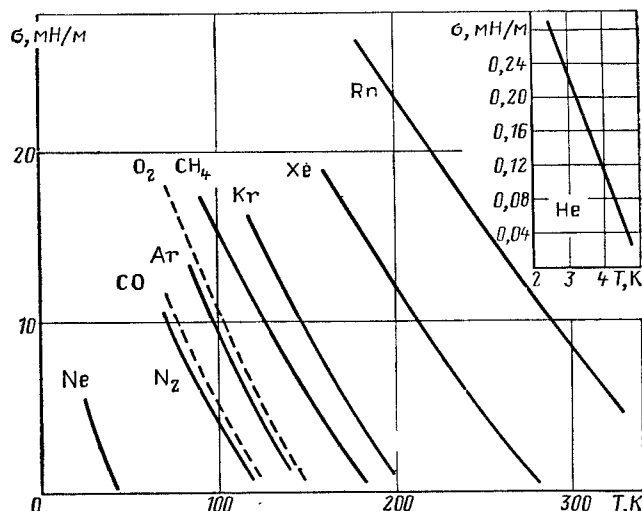


Рис. 14.1. Поверхностное натяжение сжиженных газов

Таблица 14.1. Поверхностное натяжение водорода и его изотопов, мН/м, в зависимости от температуры  $T$ , К [5]

| $T$                      | $\sigma$ | $T$                       | $\sigma$ | $T$                    | $\sigma$ | $T$                      | $\sigma$ |
|--------------------------|----------|---------------------------|----------|------------------------|----------|--------------------------|----------|
| Нормальный водород $H_2$ |          | Нормальный дейтерий $D_2$ |          | Параводород $para-H_2$ |          | Ортодеутерий $ortho-D_2$ |          |
| 20,55                    | 1,898    | 20,57                     | 3,437    | 20,70                  | 1,818    | 20,91                    | 3,355    |
| 20,86                    | 1,844    | 20,96                     | 3,346    | 21,14                  | 1,749    | 21,28                    | 3,278    |
| 21,51                    | 1,729    | 21,00                     | 3,338    | 22,47                  | 1,524    | 21,29                    | 3,278    |
| 22,07                    | 1,638    | 21,64                     | 3,201    | 22,56                  | 1,509    | 21,88                    | 3,141    |
| 22,10                    | 1,629    | 22,08                     | 3,127    | 23,07                  | 1,421    | 21,92                    | 3,139    |
| 22,21                    | 1,616    | 22,28                     | 3,062    | 23,68                  | 1,318    | 22,66                    | 2,980    |
| 22,59                    | 1,547    | 22,91                     | 2,930    | 24,09                  | 1,252    | 23,05                    | 2,895    |
| 23,23                    | 1,437    | 22,95                     | 2,924    | 24,45                  | 1,189    | 23,41                    | 2,811    |
| 24,14                    | 1,282    | 23,35                     | 2,839    | 24,51                  | 1,175    | 24,22                    | 2,632    |
| 24,63                    | 1,198    | 23,61                     | 2,777    | 25,19                  | 1,065    | 25,00                    | 2,462    |
| 25,04                    | 1,129    | 24,30                     | 2,634    | 25,54                  | 1,006    | 25,04                    | 2,448    |
| 25,33                    | 1,084    | 24,95                     | 2,493    | 25,94                  | 0,944    | 25,49                    | 2,347    |
| 25,83                    | 0,998    | 25,50                     | 2,375    | 26,41                  | 0,867    | 26,00                    | 2,235    |
| 26,27                    | 0,929    | 25,92                     | 2,275    | 26,73                  | 0,817    | 26,56                    | 2,117    |
| 26,69                    | 0,857    | 26,52                     | 2,159    | 27,17                  | 0,744    | 27,12                    | 1,999    |
| 26,99                    | 0,811    | 27,28                     | 1,983    | 27,50                  | 0,692    | 27,51                    | 1,914    |
| 27,32                    | 0,758    | 27,33                     | 1,973    | 27,99                  | 0,616    | 28,09                    | 1,787    |
| 27,70                    | 0,693    | 28,43                     | 1,743    | 28,00                  | 0,615    | 28,50                    | 1,697    |
| 28,46                    | 0,578    | 29,00                     | 1,621    | 28,46                  | 0,543    | 29,44                    | 1,493    |
| 29,00                    | 0,498    | 29,95                     | 1,428    | 28,75                  | 0,499    | 30,04                    | 1,379    |
| 29,40                    | 0,438    | 30,87                     | 1,240    | 29,02                  | 0,461    | 30,52                    | 1,275    |
| 29,59                    | 0,410    | 31,47                     | 1,119    | 29,51                  | 0,388    | 30,98                    | 1,181    |
| 30,01                    | 0,351    | 32,95                     | 0,824    | 29,70                  | 0,360    | 31,51                    | 1,075    |
| 30,45                    | 0,289    | 33,93                     | 0,637    | 30,00                  | 0,320    | 32,41                    | 0,899    |
| 30,53                    | 0,281    | 34,51                     | 0,538    | 30,44                  | 0,258    | 32,49                    | 0,887    |
| 30,96                    | 0,226    | 34,53                     | 0,531    | 30,48                  | 0,255    | 33,48                    | 0,699    |
| 31,06                    | 0,210    | 35,14                     | 0,425    | 30,99                  | 0,191    | 34,03                    | 0,597    |
| 31,58                    | 0,149    | 35,50                     | 0,364    | 31,11                  | 0,175    | 34,41                    | 0,537    |
| 31,95                    | 0,107    | 35,93                     | 0,294    | 31,62                  | 0,114    | 34,98                    | 0,432    |
| —                        | —        | 36,32                     | 0,235    | —                      | —        | 35,53                    | 0,342    |
| —                        | —        | 36,70                     | 0,181    | —                      | —        | 36,03                    | 0,264    |
| —                        | —        | —                         | —        | —                      | —        | 36,05                    | 0,261    |

#### 14.3. ВОДА

Таблица 14.2. Поверхностное натяжение воды  $\sigma$ , мН/м, в зависимости от температуры  $t$ , °C [7]

| $t$ | $\sigma$ | $t$ | $\sigma$ | $t$ | $\sigma$ | $t$    | $\sigma$ |
|-----|----------|-----|----------|-----|----------|--------|----------|
| 0   | 75,50    | 130 | 52,90    | 260 | 23,73    | 362    | 1,53     |
| 10  | 74,40    | 140 | 52,79    | 270 | 21,33    | 363    | 1,37     |
| 20  | 72,88    | 150 | 48,68    | 280 | 18,94    | 364    | 1,22     |
| 30  | 71,20    | 160 | 46,51    | 290 | 16,60    | 365    | 1,07     |
| 40  | 69,48    | 170 | 44,38    | 300 | 14,29    | 366    | 0,93     |
| 50  | 67,77    | 180 | 42,19    | 310 | 12,04    | 367    | 0,79     |
| 60  | 66,07    | 190 | 40,00    | 320 | 9,84     | 368    | 0,66     |
| 70  | 64,36    | 200 | 37,77    | 330 | 7,69     | 369    | 0,54     |
| 80  | 62,69    | 210 | 35,51    | 340 | 5,61     | 370    | 0,42     |
| 90  | 60,79    | 220 | 33,21    | 350 | 3,64     | 371    | 0,31     |
| 100 | 58,91    | 230 | 30,88    | 355 | 2,71     | 372    | 0,20     |
| 110 | 56,97    | 240 | 28,52    | 360 | 1,85     | 373    | 0,10     |
| 120 | 54,96    | 250 | 26,13    | 361 | 1,68     | 374,15 | 0        |

#### 14.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Таблица 14.3. Поверхностное натяжение предельных углеводородов от  $CH_4$  до  $C_8H_{18}$ , мН/м, в зависимости от температуры  $t$ , °C [7]

| Вещество                  | $t$  | $\sigma$ | Вещество                 | $t$ | $\sigma$ |
|---------------------------|------|----------|--------------------------|-----|----------|
| Метан $CH_4$              | —180 | 18       | Гептан $n-C_7H_{16}$     | 40  | 16,31    |
|                           | —170 | 15,8     |                          | 60  | 14,23    |
|                           | —160 | 13,7     |                          | 80  | 12,24    |
| Этан $C_2H_6$             | —160 | 28,08    |                          | 100 | 10,27    |
|                           | —150 | 26,34    |                          | 120 | 8,34     |
|                           | —140 | 24,62    |                          | 140 | 6,51     |
|                           | —130 | 22,91    |                          | 160 | 4,74     |
|                           | —120 | 21,23    |                          | 180 | 3,16     |
| Пропан $C_3H_8$           | —110 | 19,57    |                          | 200 | 1,74     |
|                           | —100 | 17,93    |                          | 210 | 1,12     |
|                           | —90  | 16,31    |                          | 220 | 0,58     |
|                           | —130 | 27,8     | Октан $n-C_8H_{18}$      | 20  | 20,86    |
|                           | —120 | 26,3     |                          | 30  | 19,54    |
|                           | —110 | 24,9     |                          | 40  | 18,47    |
|                           | —100 | 23,4     |                          | 60  | 16,39    |
|                           | —90  | 22,0     |                          | 80  | 14,35    |
|                           | —80  | 20,6     |                          | 100 | 12,47    |
|                           | —70  | 19,2     |                          | 120 | 10,63    |
|                           | —60  | 17,85    |                          | 140 | 8,87     |
|                           | —50  | 16,49    |                          | 160 | 7,19     |
|                           | —40  | 15,15    |                          | 180 | 5,59     |
| Бутан $n-C_4H_{10}$       | —100 | 27,2     |                          | 200 | 4,07     |
|                           | —90  | 25,9     |                          | 220 | 2,63     |
|                           | —80  | 24,6     |                          | 230 | 1,94     |
|                           | —70  | 23,4     |                          | 240 | 1,29     |
|                           | —60  | 22,1     | Изооктан $изо-C_8H_{18}$ | —40 | 27,50    |
|                           | —50  | 20,88    |                          | —20 | 25,50    |
|                           | —40  | 19,65    |                          | 0   | 23,70    |
|                           | —30  | 18,43    |                          | 10  | 22,73    |
| Изобутан $изо-C_4H_{10}$  | —100 | 25,2     |                          | 20  | 21,76    |
|                           | —90  | 23,9     |                          | 30  | 20,79    |
|                           | —80  | 22,6     |                          | 40  | 19,78    |
|                           | —70  | 21,4     |                          | 60  | 17,82    |
|                           | —60  | 20,14    |                          | 80  | 15,94    |
|                           | —50  | 18,90    |                          | 100 | 14,13    |
|                           | —40  | 17,68    |                          | 120 | 12,39    |
|                           | —30  | 16,48    |                          | 140 | 10,70    |
|                           | —20  | 20,5     |                          | 160 | 9,07     |
|                           | —10  | 19,3     | Пентан $n-C_5H_{12}$     | 180 | 7,50     |
| Изопентан $изо-C_5H_{12}$ | 0    | 18,2     |                          | 200 | 5,99     |
|                           | 10   | 17,1     |                          | 220 | 4,52     |
|                           | 20   | 16,00    |                          | 230 | 3,80     |
|                           | 25   | 15,48    |                          | 240 | 3,10     |
|                           | 30   | 14,95    | Гексан $n-C_6H_{14}$     | 0   | 20,58    |
|                           | 40   | 13,80    |                          | 10  | 18,77    |
|                           | —20  | 19,40    |                          | 25  | 18,32    |
|                           | —10  | 18,27    |                          | 30  | 17,88    |
|                           | 0    | 17,17    |                          | 40  | 16,99    |
|                           | 10   | 16,08    |                          | 50  | 16,11    |
|                           | 20   | 15,00    |                          | 60  | 15,24    |
|                           | 25   | 14,46    |                          | 70  | 14,40    |
|                           | 30   | 13,93    |                          | 80  | 13,50    |
|                           | 0    | 20,56    |                          | 90  | 12,70    |
|                           | 10   | 19,51    |                          |     |          |
|                           | 20   | 18,46    |                          |     |          |
|                           | 30   | 17,40    |                          |     |          |

Таблица 14.4. Поверхностное натяжение  $\sigma$  нормальных предельных углеводородов ( $C_nH_{2n+2}$ ) от  $C_9H_{20}$  до  $C_{20}H_{42}$ , мН/м [7]

| Вещество   | $t, ^\circ C$ |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 0             | 10    | 20    | 25    | 30    | 40    | 50    | 75    | 100   |
| Нонан      | 24,84         | 23,90 | 22,96 | 22,49 | 22,01 | 21,07 | 20,13 | 17,78 | 15,42 |
| Декан      | 25,73         | 24,81 | 23,89 | 23,43 | 22,98 | 22,06 | 21,14 | 18,84 | 16,54 |
| Ундекан    | 26,57         | 25,68 | 24,78 | 24,34 | 23,89 | 23,00 | 22,10 | 19,87 | 17,63 |
| Додекан    | 27,24         | 26,34 | 25,48 | 25,04 | 24,60 | 23,72 | 22,85 | 20,65 | 18,45 |
| Тридекан   | 27,87         | 27,00 | 26,13 | 25,69 | 25,26 | 24,39 | 23,52 | 21,34 | 19,16 |
| Тетрадекан | —             | 27,56 | 26,69 | 26,26 | 25,83 | 24,97 | 24,11 | 21,94 | 19,79 |
| Пентадекан | —             | 28,02 | 21,17 | 26,74 | 26,32 | 25,46 | 24,61 | 22,48 | 20,35 |
| Гексадекан | —             | —     | 27,64 | 27,22 | 26,79 | 25,95 | 25,11 | 23,00 | 20,90 |
| Гептадекан | —             | —     | —     | 27,64 | 27,22 | 26,38 | 25,54 | 23,45 | 21,35 |
| Октадекан  | —             | —     | —     | —     | 27,59 | 26,75 | 25,92 | 23,84 | 21,75 |
| Нонадекан  | —             | —     | 28,7  | 28,2  | 27,8  | 26,9  | 26,0  | —     | 22,5  |
| Эйкозан    | —             | —     | 29,0  | 28,6  | 28,1  | 27,2  | 26,4  | —     | 23,0  |

Таблица 14.5. Поверхностное натяжение непредельных углеводородов рядов этилена и ацетилен и диолефинов, мН/м, в зависимости от температуры  $t, ^\circ C$  [7]

| Вещество                | $t$                                         | $\sigma$                                                             | Вещество               | $t$                               | $\sigma$                                           |
|-------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| Этилен<br>$C_2H_4$      | —120<br>—110<br>—100                        | 19,50<br>17,65<br>15,71                                              | Октен-1<br>$C_8H_{16}$ | 0<br>10<br>20                     | 23,83<br>22,87<br>21,97                            |
| Гексен-1<br>$C_6H_{12}$ | 0<br>10<br>20<br>25<br>30<br>40<br>50       | 20,58<br>19,55<br>18,52<br>18,00<br>17,49<br>16,46<br>15,43          |                        | 25<br>30<br>40<br>50<br>75<br>100 | 21,44<br>20,95<br>19,99<br>19,03<br>16,64<br>14,24 |
| Гептен-1<br>$C_7H_{14}$ | 0<br>10<br>20<br>25<br>30<br>40<br>50<br>75 | 22,40<br>21,41<br>20,42<br>19,93<br>19,43<br>18,44<br>17,45<br>14,98 | Ацетилен<br>$C_2H_2$   | —80<br>—70<br>—60<br>—50          | 18,92<br>16,99<br>15,06<br>13,13                   |
|                         |                                             |                                                                      | Пропадиен<br>$C_3H_4$  | —50<br>—40<br>—30<br>—20          | 21,99<br>20,44<br>18,90<br>17,35                   |

Таблица 14.6. Поверхностное натяжение циклических углеводородов, мН/м, в зависимости от температуры  $t, ^\circ C$  [7]

| Вещество                | $t$                             | $\sigma$                                           | Вещество                   | $t$                 | $\sigma$                         |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Циклопентен<br>$C_5H_8$ | 0<br>10<br>20<br>25<br>30<br>40 | 25,25<br>23,94<br>22,65<br>21,99<br>21,32<br>20,03 | Циклопентан<br>$C_5H_{10}$ | 13,5                | 23,30                            |
|                         |                                 |                                                    | Циклогексен<br>$C_6H_{10}$ | 0<br>10<br>20<br>25 | 29,00<br>27,80<br>26,61<br>26,01 |

Продолжение табл. 14.6

| Вещество                        | $t$                                                | $\sigma$                                                                      | Вещество                    | $t$                                                                                           | $\sigma$                                                                                                        |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Циклогексен<br>$C_6H_{10}$      | 30<br>40<br>50<br>75                               | 25,41<br>24,22<br>23,02<br>20,03                                              | Анилин<br>$C_6H_5NH_2$      | 0<br>10<br>20<br>30<br>40<br>50<br>100<br>150<br>180                                          | 45<br>44<br>42,9<br>41,8<br>40,7<br>39,5<br>33,7<br>27,9<br>24,6                                                |
| Метилциклопентан<br>$C_6H_{12}$ | 13,5                                               | 24,10                                                                         | Хлорбензол<br>$C_6H_5Cl$    | 0<br>10<br>20<br>30<br>40<br>60<br>80<br>100<br>150<br>200<br>250<br>300<br>310<br>320<br>330 | 36,0<br>34,8<br>33,5<br>32,3<br>31,1<br>28,7<br>26,4<br>24,0<br>18,5<br>13,2<br>8,3<br>3,9<br>3,1<br>2,4<br>1,7 |
| Циклогексан<br>$C_6H_{12}$      | 10<br>20<br>25<br>30<br>40<br>50<br>75             | 26,15<br>24,95<br>24,35<br>23,75<br>22,45<br>21,35<br>18,35                   | Нитробензол<br>$C_6H_5NO_2$ | 0<br>10<br>20<br>30<br>40<br>60<br>100<br>150<br>200                                          | 46,4<br>45,2<br>43,9<br>42,7<br>41,5<br>39,0<br>34,4<br>29,0<br>23,6                                            |
| Метилциклогексан<br>$C_7H_{14}$ | 0<br>10<br>20<br>30<br>40<br>50<br>60<br>70<br>100 | 25,80<br>24,74<br>23,68<br>23,15<br>22,62<br>21,56<br>20,50<br>17,58<br>15,20 |                             |                                                                                               |                                                                                                                 |
| Этилциклогексан<br>$C_8H_{16}$  | 0<br>10<br>20<br>25<br>30<br>40<br>50<br>75<br>100 | 27,87<br>26,77<br>25,67<br>25,12<br>24,57<br>23,47<br>22,37<br>19,62<br>16,87 |                             |                                                                                               |                                                                                                                 |

Таблица 14.7. Поверхностное натяжение  $\sigma$  ароматических углеводородов, мН/м [7]

| Вещество                                              | $t, ^\circ\text{C}$ |       |       |       |       |       |       |       |      |      |
|-------------------------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|                                                       | 0                   | 10    | 20    | 25    | 30    | 40    | 50    | 60    | 80   | 100  |
| Бензол $\text{C}_6\text{H}_6$                         | —                   | 30,24 | 28,88 | 28,18 | 27,49 | 26,14 | 24,88 | 23,66 | 21,2 | —    |
| Толуол $\text{C}_7\text{H}_8$                         | 30,92               | 29,70 | 28,53 | 27,29 | 27,32 | 26,15 | 25,04 | 23,94 | 21,8 | 19,6 |
| орто-Ксилол $\text{C}_8\text{H}_{10}$                 | 32,28               | 31,16 | 30,03 | 29,48 | 28,93 | 27,84 | 26,76 | 25,70 | 23,6 | 21,5 |
| мета-Ксилол $\text{C}_8\text{H}_{10}$                 | 30,92               | 29,78 | 28,63 | 28,08 | 27,54 | 26,44 | 25,36 | 24,26 | 22,2 | 20,1 |
| пара-Ксилол $\text{C}_8\text{H}_{10}$                 | —                   | —     | 28,31 | 27,76 | 27,22 | 26,13 | 25,06 | 24,02 | 22,0 | 20,1 |
| Этилбензол $\text{C}_8\text{H}_{10}$                  | 31,38               | 30,18 | 29,04 | 28,48 | 27,93 | 26,79 | 25,74 | 24,74 | 22,7 | 20,7 |
| изо-Пропилбензол (кумол)<br>$\text{C}_9\text{H}_{12}$ | —                   | —     | 28,20 | 27,68 | 27,17 | 26,09 | 25,08 | 24,07 | 22,2 | —    |

Таблица 14.8. Поверхностное натяжение галоидопроизводных углеводородов, мН/м, в зависимости от температуры  $t, ^\circ\text{C}$  [7]

| Вещество                                              | $t$ | $\sigma$ |
|-------------------------------------------------------|-----|----------|
| Дифтордихлорметан (фреон-12) $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ | 20  | 9,0      |
|                                                       | 30  | 7,5      |
|                                                       | —30 | 23,5     |
| Трифторхлорметан (фреон-13) $\text{CF}_3\text{Cl}$    | —20 | 22,0     |
|                                                       | —10 | 20,5     |
|                                                       | 0   | 18,5     |
|                                                       | 10  | 17,3     |
|                                                       | 20  | 16,0     |
|                                                       | 30  | 14,0     |
|                                                       | —   | —        |
| Хлористый метил $\text{CH}_3\text{Cl}$                | 0   | 12,0     |
|                                                       | 10  | 11,0     |

Продолжение табл. 14.8

| Вещество                                | $t$ | $\sigma$ |
|-----------------------------------------|-----|----------|
| Четыреххлористый углерод $\text{CCl}_4$ | 0   | 29,5     |
|                                         | 10  | 28,2     |
|                                         | 20  | 26,9     |
|                                         | 40  | 24,5     |
|                                         | 60  | 22,1     |
|                                         | 80  | 19,7     |
|                                         | 100 | 17,3     |
|                                         | 150 | 11,7     |
|                                         | 200 | 6,5      |
|                                         | 250 | 2,1      |
|                                         | 260 | 1,4      |
|                                         | 270 | 0,7      |

Таблица 14.9. Поверхностное натяжение  $\sigma$  спиртов, эфиров, кетонов и органических кислот, мН/м [7]

| Вещество                                            | $t, ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |      |      |      |     |     |
|-----------------------------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
|                                                     | 0                   | 10   | 20   | 30   | 50   | 100  | 150  | 200  | 220 | 240 |
| Метиловый спирт $\text{CH}_3\text{OH}$              | 24,5                | 23,5 | 22,6 | 21,8 | 20,1 | 15,7 | 10,4 | 4,5  | 2,1 | —   |
| Этиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$      | 24,4                | 23,6 | 22,8 | 21,9 | 20,1 | 15,5 | 10,1 | 4,3  | 2,2 | 0,1 |
| Изопропиловый спирт $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ | 25,5                | 24,6 | 23,8 | 23,0 | 21,2 | 17,2 | —    | —    | —   | —   |
| Бутиловый спирт $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$     | 26,2                | 25,4 | 24,6 | 23,8 | 22,1 | 17,8 | —    | —    | —   | —   |
| Глицерин $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$        | —                   | —    | 59,4 | 59,0 | 58,0 | 54,2 | 48,8 | —    | —   | —   |
| Эфир диэтиловый $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$   | 19,4                | 18,2 | 17,0 | 15,8 | 13,5 | 8,0  | 3,1  | —    | —   | —   |
| Этилацетат $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$         | 27,0                | 25,6 | 24,3 | 23,0 | 20,5 | 14,4 | 8,7  | 3,7  | 2,0 | 0,5 |
| Ацетон $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$               | 26,2                | 25,0 | 23,7 | 22,5 | 19,9 | —    | —    | —    | —   | —   |
| Уксусная кислота $\text{CH}_3\text{COOH}$           | —                   | —    | 27,8 | 26,8 | 24,8 | 19,8 | 15,0 | 10,4 | 8,5 | 5,7 |

Таблица 14.10. Поверхностное натяжение органических жидкостей на границе с водой при 20 °С, мН/м [4]

| Вещество                 | $\sigma$ |
|--------------------------|----------|
| Амилцетат                | 12,0     |
| Амиловый спирт           | 4,4      |
| Анилин                   | 5,8      |
| Бензальдегид             | 15,5     |
| Бензол                   | 35,0     |
| Бромбензол               | 38,1     |
| Бромоформ                | 40,0     |
| Бутиловый спирт          | 1,8      |
| Гексан                   | 49,4     |
| Гексадекан               | 52,6     |
| Гексиловый спирт         | 6,8      |
| Гептан                   | 50,2     |
| Гептиловый спирт         | 7,7      |
| Декан                    | 51,2     |
| Дибромэтан               | 36,5     |
| Дихлорметан              | 28,3     |
| Дихлорэтан               | 31,0     |
| Диэтиловый эфир          | 10,7     |
| Додекан                  | 51,8     |
| Изоамиловый спирт        | 4,8      |
| Изобутиловый спирт       | 2,0      |
| Изовалериановая кислота  | 2,7      |
| Изооктан                 | 51,0     |
| Изопентан                | 49,0     |
| Иодбензол                | 41,8     |
| Каприловая кислота       | 8,2      |
| Капроновая кислота       | 5,2      |
| мета-Ксилол              | 37,9     |
| орто-Ксилол              | 36,1     |
| пара-Ксилол              | 37,8     |
| Мезитилен                | 38,7     |
| Метилбензоат             | 16,6     |
| Нитробензол              | 25,7     |
| мета-Нитротолуол         | 27,7     |
| орто-Нитротолуол         | 27,2     |
| Октан                    | 50,8     |
| Октановый спирт          | 8,5      |
| Олеиновая кислота        | 15,7     |
| Пентан                   | 49,0     |
| Сероуглерод              | 48,4     |
| Стирол                   | 34,0     |
| Тетрадекан               | 52,2     |
| Тетрахлорэтилен          | 47,5     |
| Толуол                   | 36,1     |
| Фурфурол                 | 5,1      |
| Хлорбензол               | 37,4     |
| Хлороформ                | 31,6     |
| Четыреххлористый углерод | 45,0     |
| Циклогексан              | 50,2     |
| Циклогексанол            | 3,9      |
| Цимол                    | 34,6     |
| Этилбензол               | 38,4     |
| Этилбромид               | 31,2     |

# 14.5. ЖИДКИЕ МЕТАЛЛЫ

Таблица 14.11. Поверхностное натяжение  $\sigma$  жидких щелочных металлов, мН/м [7]

| $t, ^\circ\text{C}$ | Li  | Na    | K     | Rb   | Cs   |
|---------------------|-----|-------|-------|------|------|
| 29                  | —   | —     | —     | —    | 71,3 |
| 39                  | —   | —     | —     | 87,5 | —    |
| 64                  | —   | —     | 109   | —    | —    |
| 100                 | —   | 197,8 | 106,6 | 84,0 | 67,9 |
| 200                 | 395 | 187,8 | 100   | 78,2 | 63,1 |
| 300                 | 381 | 177,8 | 93,4  | 72,4 | 58,3 |
| 400                 | 367 | 167,8 | 86,8  | 66,4 | 53,5 |
| 500                 | 353 | 157,8 | 80,2  | 60,8 | 48,7 |
| 600                 | 339 | 147,8 | 73,6  | 55,0 | 43,9 |
| 700                 | 325 | 137,8 | 67,0  | 49,2 | 39,1 |
| 800                 | 311 | 127,8 | 60,4  | 43,4 | 34,3 |
| 900                 | 297 | 117,8 | 53,8  | 37,6 | 29,5 |
| 1000                | 283 | 107,8 | 47,2  | 31,8 | 24,7 |
| 1100                | 269 | 97,8  | 40,6  | 26,0 | 19,9 |
| 1200                | 255 | 87,8  | 34,0  | 20,2 | 15,1 |
| 1300                | 241 | 77,8  | 27,4  | 14,4 | 10,3 |
| 1400                | 227 | 67,8  | 20,8  | 8,6  | —    |
| 1500                | 223 | 57,8  | 14,2  | —    | —    |

Таблица 14.12. Поверхностное натяжение жидких металлов, мН/м, в зависимости от температуры  $t, ^\circ\text{C}$  [8]

| Металл       | $t$  | $\sigma$      |
|--------------|------|---------------|
| Алюминий [9] | 660  | 915           |
|              | 800  | 850           |
|              | 1000 | 830           |
|              | 1100 | 820           |
|              | 1600 | 725           |
|              | 1830 | 680           |
|              | 1273 | 267,3         |
| Барий [10]   | 1373 | 259,7         |
|              | 1473 | 253,0         |
|              | 1573 | 246,3         |
|              | 1673 | 239,6         |
|              | 1773 | 232,9         |
|              | 1873 | 226,2         |
|              | 1973 | 219,4         |
|              | 2073 | 212,7         |
|              | 2173 | 206,0         |
|              | 2273 | 199,3         |
| Бериллий     | 1500 | 1100 $\pm$ 35 |
| Бор          | 2200 | 1060          |
| Ванадий      | 1919 | 1950          |
| Висмут       | 280  | 372,1         |
|              | 300  | 371,0         |
|              | 400  | 364,6         |
|              | 500  | 357,9         |
| Вольфрам     | 800  | 343           |
|              | 900  | 336           |
|              | 1000 | 328           |
|              | 3395 | 2316          |
| Гадолиний    | 1350 | 670           |
|              | 50   | 706           |
| Галлий       | 100  | 705           |
|              | 200  | 704           |
|              | 300  | 699           |
|              | 400  | 694           |
|              | 450  | 690           |

| Металл      | $t$  | $\sigma$ |
|-------------|------|----------|
| Гафний      | 2200 | 1630     |
| Германий    | 1100 | 604,5    |
|             | 1100 | 594      |
|             | 1550 | 558      |
| Диспрозий   | 1407 | 490      |
| Железо      | 1550 | 1850     |
|             | 1600 | 1830     |
|             | 1650 | 1790     |
|             | 1700 | 1760     |
| Золото      | 1100 | 1125     |
| Индий       | 200  | 556,0    |
|             | 300  | 547,4    |
|             | 400  | 535,0    |
|             | 500  | 531,2    |
|             | 600  | 522,5    |
|             | 700  | 512,8    |
|             | 800  | 2504,6   |
| Иридий      | 2454 | 250      |
| Иттрий      | 1450 | 877      |
| Кадмий      | 330  | 560      |
| Кальций     | 851  | 1370     |
| Кобальт     | 1550 | 1830     |
|             | 1600 | 770      |
| Кремний     | 1550 | 750      |
| Лантан      | 810  | 745      |
| Магний [11] | 670  | 552      |
|             | 700  | 542      |
|             | 720  | 534      |
|             | 740  | 528      |
| Марганец    | 1350 | 1070     |
|             | 1550 | 1030     |
| Медь        | 1150 | 1370     |
|             | 1550 | 1265     |
| Молибден    | 2622 | 2225     |
| Неодим      | 840  | 688      |
| Никель      | 1550 | 1735     |
|             | 1850 | 1620     |
| Ниобий      | 2468 | 2040     |
| Олово       | 300  | 530      |
|             | 350  | 537      |
|             | 450  | 535      |
|             | 500  | 531      |
|             | 600  | 525      |
|             | 650  | 514      |
| Осмий       | 2700 | 2500     |
| Палладий    | 1554 | 1500     |
|             | 1600 | 1460     |
| Платина     | 1760 | 1800     |
|             | 1800 | 1699(20) |
| Празеодим   | 940  | 706      |
| Рений       | 3180 | 2700     |
| Родий       | 1966 | 2000     |
| Ртуть       | 25   | 465      |
|             | 50   | 462      |
|             | 100  | 452      |
|             | 150  | 439      |
|             | 200  | 429      |
|             | 250  | 416      |
|             | 300  | 402      |
|             | 350  | 387      |
| Рутений     | 2500 | 2250     |
| Свинец      | 350  | 440      |
|             | 450  | 428      |
|             | 750  | 420      |
|             | 800  | 412      |
|             | 1000 | 388      |

| Металл        | $t$  | $\sigma$  |
|---------------|------|-----------|
| Селен         | 220  | 105       |
|               | 240  | 104       |
|               | 280  | 101       |
|               | 340  | 87        |
|               | 380  | 80        |
| Серебро       | 1000 | 907       |
|               | 1100 | 894       |
|               | 1200 | 876       |
| Стронций [10] | 797  | 288—292   |
|               | 1373 | 286,1     |
|               | 1473 | 280,3     |
|               | 1573 | 274,4     |
|               | 1673 | 268,6     |
|               | 1773 | 262,7     |
|               | 1873 | 256,8     |
|               | 1973 | 251,0     |
|               | 2073 | 245,1     |
|               | 2173 | 239,3     |
|               | 2273 | 233,4     |
| Сурьма        | 650  | 350,2     |
|               | 700  | 347,6     |
|               | 750  | 346,2     |
|               | 800  | 345,0     |
|               | 302  | 464,5     |
| Таллий        | 2996 | 2140—2150 |
| Тантал        | 452  | 179       |
| Теллур        | 1356 | 700       |
| Тербий        | 1672 | 1558      |
| Титан         | 1727 | 1460      |
|               | 1130 | 1550      |
| Уран          | 1830 | 1540      |
| Хром          | 420  | 767 (5)   |
| Цинк          | 1855 | 1455      |
| Цирконий      | 2460 | 1395      |

Таблица 14.13. Влияние кислорода и углерода на поверхностное натяжение железа [8]

| Массовое содержание, %             | $\tau$ , мН/м | Массовое содержание, %            | $\sigma$ , мН/м |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------|
| Кислород, $t = 1570^\circ\text{C}$ |               | Углерод, $t = 1550^\circ\text{C}$ |                 |
| 0,0006                             | 1717          | 0,42                              | 1847            |
| 0,0077                             | 1632          | 2,25                              | 1822            |
| 0,02                               | 1541          | 3,15                              | 1793            |
| 0,041                              | 1362          | 3,50                              | 1805            |
| 0,07                               | 1151          | 4,15                              | 1788            |

## 14.6. РАСПЛАВЫ СОЛЕЙ

Таблица 14.14. Поверхностное натяжение расплавленных солей [1]

| Вещество        | $t$ , $^\circ\text{C}$ | $\sigma$ , мН/м | Вещество                          | $t$ , $^\circ\text{C}$ | $\sigma$ , мН/м |
|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------|
| $\text{BiCl}_3$ | 271                    | 66,0            | $\text{NaNO}_3$                   | 308                    | 116,6           |
| $\text{KClO}_3$ | 368                    | 81,0            | $\text{K}_2\text{Gr}_2\text{O}_7$ | 397                    | 129,0           |
| $\text{KNCs}$   | 175                    | 101,5           | $\text{Ba(NO}_3)_2$               | 595                    | 134,8           |

Таблица 14.15. Удельная свободная  
поверхностная энергия твердых металлов [12]

| Металл           | $t$ , °C | Атмосфера            | $\sigma_T$ , мДж/м² |
|------------------|----------|----------------------|---------------------|
| Алюминий         | 180      | Вакуум               | 1140±200            |
| Бериллий         | 700      | Гелий                | 1000                |
| Висмут           | 239      | Вакуум }<br>Аргон }  | 521±6               |
| Вольфрам         | 1500     | Вакуум               | 2830±470            |
|                  | 1757     | Вакуум               | 2900±290            |
| Железо           | 1460     | Аргон                | 1910±190            |
|                  | 1410     | Водород              | 2320±80             |
| $\gamma$ -Железо | 1380     | Аргон                | 2170±300            |
| Золото           | 970      | Вакуум               | 1450±80             |
|                  | 1025     | Гелий                | 1400±65             |
|                  | 968      | Воздух               | 1390±80             |
| Индий            | 142      | Вакуум }<br>Аргон }  | 633±7               |
| Кобальт          | 1354     | Водород              | 1970±175            |
| Медь             | 1006     | Гелий }<br>Водород } | 1720                |
| Молибден         | 1427     | Вакуум               | 2200±200            |
|                  | 1600     | Аргон                | 2100±200            |
|                  | 2500     | Аргон                | 1920±200            |

Продолжение табл. 14.15

| Металл                 | $t$ , °C | Атмосфера           | $\sigma_T$ , мДж/м² |
|------------------------|----------|---------------------|---------------------|
| Ниобий                 | 2250     | Вакуум              | 2100±100            |
| Никель                 | 1343     | Аргон               | 1820±180            |
|                        | 1219     | Вакуум              | 1860±190            |
| Олово                  | 215      | Вакуум }<br>Аргон } | 673±7               |
| Платина                | 1310     | Вакуум              | 2340±800            |
|                        | 1673     | Воздух              | 1800±200            |
| Свинец                 | 309      | Вакуум }<br>Аргон } | 560±6               |
| Серебро                | 750      | Азот                | 1140±35             |
|                        | 909      | Гелий               | 1140±90             |
| Таллий                 | 272      | Вакуум }<br>Аргон } | 562±6               |
| Тантал                 | 1500     | Вакуум              | 2680±500            |
| Титан                  | 1600     | Вакуум              | 1700                |
| Цинк                   | 480      | Гелий               | 830                 |
| Цинк, плоскость (0001) | -195     | Азот (жидкий)       | 410                 |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей.: Пер. с англ. М.: Мир. 1979.
2. Шукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. М.: Изд-во МГУ. 1982.
3. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика.: Пер. с англ. М.: Наука. 1982.
4. Абрамзон А. А. Поверхностно-активные вещества. — 2-е изд. Л.: Химия. 1981.
5. Байдаков В. Г., Хвостов К. В., Скрипов В. П. Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение неона, водорода и его изотопов. Свердловск: Изд. Уральского научного центра АН СССР. 1981.
6. Байдаков В. Г., Хвостов К. В., Муратов Г. Н., Скрипов В. П. Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение аргона, криптона, ксенона, метана, кислорода и азота. Свердловск: Изд. Уральского научного центра АН СССР. 1981.

7. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — 2-е изд. М.: Наука. 1972.

8. Ниженко В. И., Флока Л. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия. 1981.

9. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. Киев: Наукова думка. 1972.

10. Шпильрайн Э. Э., Фомин В. А., Качалов В. В., Сокол Г. Ф., Сквородько С. Н. Теплофизические свойства щелочноземельных металлов в жидкой фазе (плотность, поверхностное натяжение, вязкость). Обзор по теплофизическим свойствам веществ. М.: Изд. Науч.-информ. центра по теплофизическим свойствам чистых веществ АН СССР. 1983. № 2 (40).

11. Андронов В. Н., Чекин Б. В., Нестеренко С. В. Жидкие металлы и шлаки. М.: Металлургия. 1977.

12. Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. М.: Металлургия. 1978.

## ГЛАВА 15

### ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

А. В. Инюшкин

## 15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплопроводность — молекулярный перенос теплоты (теплоперенос) в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температур. Коэффициент теплопроводности (как теперь принято, теплопроводность) определя-

ется уравнением Фурье

$$q = -\lambda \nabla T,$$

где  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м²;  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К);  $\nabla T$  — градиент температуры, К/м. Ниже приведены соотношения между единицами теплопроводности:



$$1 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К}) = 1 \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ эрг}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С}) = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ кал}_{\text{IT}}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С}) = 4,1868 \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ кал}_{\text{th}}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С}) = 4,184 \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ ккал}_{\text{th}}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}) = 1,16222 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ Вт}_{\text{IT}}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 1,73073 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ Вт}_{\text{IT}} \cdot \text{in}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 0,144228 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ Вт}_{\text{th}}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 1,72958 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ Вт}_{\text{th}} \cdot \text{in}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 0,144131 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ CHU}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 3,1152 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 1 \cdot 10^5 \text{ эрг}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 2,38846 \cdot 10^{-3} \text{ кал}_{\text{IT}}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 2,39006 \cdot 10^{-3} \text{ кал}_{\text{th}}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 0,860421 \text{ ккал}_{\text{th}}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 5,77789 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}_{\text{IT}}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 0,693347 \text{ Вт}_{\text{IT}} \cdot \text{in}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 5,78176 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}_{\text{th}}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 0,693811 \text{ Вт}_{\text{th}} \cdot \text{in}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = 0,32100 \text{ CHU}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

Примечание. Международная калория:  $1 \text{ кал}_{\text{IT}} = 4,1868 \text{ Дж}$  (точное значение).

Термохимическая калория:  $1 \text{ кал}_{\text{th}} = 4,1840 \text{ Дж}$ .

Британская тепловая единица:  $1 \text{ Вт}_{\text{IT}} = 1,05505 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ .

$1 \text{ Вт}_{\text{th}} = 1,05435 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ .

$1 \text{ CHU} = 1899,1 \text{ Дж}$ .

Уравнение Фурье справедливо для небольших значений градиента температуры (когда отклонение системы от равновесного состояния мало) и в случае, когда средняя длина свободного пробега частиц (квазичастиц), участвующих в теплопереносе, мала по сравнению с геометрическими размерами системы. Для кристаллических твердых тел коэффициент теплопроводности представляет собой симметричный тензор второго ранга.

Процесс распространения теплоты описывается уравнением теплопроводности, которое в простейшем случае имеет вид

$$\partial T / \partial t = (\lambda / c \gamma) \nabla^2 T,$$

где  $T(x, y, z, t)$  — температура, К, в точке с координатами  $x, y, z$ ;  $t$  — время, с;  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\gamma$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\nabla^2 T = \partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2$ , К/м<sup>2</sup>.

Экспериментальные методы определения теплопроводности основаны на решении уравнения теплопроводности [1, 2].

Теплопроводность зависит от агрегатного состояния вещества, его состава, чистоты, температуры, давления и других характеристик. Так, для большинства веществ теплопроводность жидкой фазы примерно в 10 раз больше, чем теплопроводность газообразной фазы, а для твердого тела она значительно выше, чем для жидкости около точки плавления (за исключением жидких висмута, олова, теллура).

На практике часто случается, что теплопроводность внутри тела и вблизи его границ различна. Это различие обусловлено как изменением условий протекания процессов теплопереноса, так и изменением структуры вещества (в результате термообработки, наклепа и т. д.). В таблицах этой главы приведены коэффициенты теплопроводности для части тела, удаленной на достаточное расстояние от границ.

Существенное влияние на теплопроводность могут оказывать внешние факторы, например облучение, изменение давления, магнитного поля.

В полупрозрачных средах теплопроводность сопровождается радиационным теплопереносом. Наблюдаемая эффективная теплопроводность таких сред есть сумма собственно теплопроводности и радиационного теплопе-

реноса. Вклад радиационной составляющей комбинированного теплопереноса увеличивается с повышением температуры и становится существенным при температурах, составляющих несколько сотен градусов Цельсия.

Погрешность приведенных в настоящей главе данных о теплопроводности меняется в зависимости от вещества, области температур (как правило, увеличивается при низких и высоких температурах) и давлений (увеличивается с повышением давления). В основном погрешность значений теплопроводности составляет 10—20%. Для ряда веществ, изученных наилучшим образом, погрешность данных лежит в пределах 1—2%. Число значащих цифр в приведенных значениях  $\lambda$  в целом согласуется с их погрешностью. Однако в тех случаях, когда целесообразно показать характер изменения  $\lambda$  (например, в зависимости от состава вещества или температуры), число значащих цифр увеличено до трех.

Основные вопросы теории теплопроводности, а также экспериментальные методы исследований теплопроводности рассмотрены в [3].

## 15.2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

В табл. 15.1 собраны в основном обобщенные данные о теплопроводности веществ в диапазоне температур от 4 до 1000 К. В редких случаях приведены данные отдельных экспериментов.

Значения  $\lambda$  при средних и высоких температурах для твердых веществ близки к значениям коэффициента теплопроводности хорошо отожженных высокочистых (степень чистоты 99,99%) образцов.

При низких температурах теплопроводность твердых элементов сильно зависит от степени совершенства кристалла, наличия примесей и других дефектов. Значения  $\lambda$  при температурах вблизи и ниже температуры, соответствующей максимуму теплопроводности, относятся к наиболее чистым и совершенным образцам. Для металлов приведены значения остаточного удельного электрического сопротивления  $\rho_0$  [либо отношения  $\rho(300 \text{ К})/\rho_0$ ], которые характеризуют качество образцов.

Теплопроводности простейших газообразных веществ приведены при давлении  $10^5 \text{ Па}$ .

В целом погрешность значений  $\lambda$  при средних температурах меняется от 2 до 10% в зависимости от вещества и возрастает до 20% при низких и высоких температурах.

Подробную информацию о теплопроводности элементов и оценки погрешностей можно найти в [4—7].

### 15.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ

Теплопроводность разреженного газа слабо зависит от температуры (как  $T^{0.6}$ ) и давления (табл. 15.2 и 15.3). Газ можно считать существенно разреженным до давления порядка  $10^6$  Па при комнатной температуре и до давления примерно  $4 \cdot 10^6$  Па при  $T \approx 1000$  К [8]. Для оценки теплопроводности разреженного газа применима формула Эйнса

$$\lambda = 10^2 c_v / M [1 + (9/4) R / c_v],$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость, Па·с;  $c_v$  — молярная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(моль·К);  $M$  — молярная масса, кг/моль;  $R$  — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К).

При высоких давлениях  $\lambda$  зависит от давления. В табл. 15.4 приведены зависимости теплопроводности некоторых газов от давления. При низких давлениях, когда длина свободного пробега молекул сравнима с размерами сосуда (для большинства систем при  $p < 10$  Па), теплопроводность пропорциональна давлению газа и стремится к нулю с уменьшением давления. В этих условиях теплопроводность определяется не только свойствами газа, но и энергообменом на границах, который характеризуют коэффициентом accommodation.

Результаты теоретического и экспериментального исследований различных аспектов теплопроводности газов приведены в [9—11]. Теплоперенос в вакууме, заполненном сильно разреженным газом, рассматривается в [12]. Экспериментальные данные о теплопроводности большинства изученных веществ в газообразном состоянии систематизированы в справочниках [6, 13, 14].

### 15.4. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Теплопроводность жидкости при температуре 0 °С и атмосферном давлении с погрешностью  $\pm 10\%$  может быть рассчитана по полуэмпирической формуле [15]

$$\lambda(0^\circ\text{C}) = 9 \cdot 10^{-3} N^{-1/4} (T_{\text{кип}} \gamma)^{1/2} c_p,$$

где  $N$  — число атомов в молекуле жидкости;  $T_{\text{кип}}$  — температура кипения, К;  $\gamma$  — плотность жидкости, г/см<sup>3</sup>;  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(см<sup>3</sup>·К).

Теплопроводность жидкости увеличивается при повышении температуры (вода и глицерин представляют исключение). В интервале температур  $-50 < t < 50$  °С зависимость  $\lambda(t)$  может быть приближенно представлена выражением [15]

$$\lambda(t) = \lambda(0^\circ\text{C}) [1 + 0,01t (T_{\text{кип}}^{1/2} / 23,5 - 1)],$$

где  $t$  — температура, °С. Теплопроводности жидкостей приведены в табл. 15.5 и 15.6.

У всех жидкостей теплопроводность увеличивается с ростом давления. Это увеличение практически несущественно до давлений  $5 \cdot 10^6$  Па. При высоких давлениях, достигающих  $1,2 \cdot 10^9$  Па, теплопроводность при температуре 0 °С можно рассчитать по формуле [15]

$$\lambda(p) = \lambda(0 \text{ Па}) [1 + (T_{\text{кип}} \gamma_0)^{-1/2} (p / 1,44 \cdot 10^9)^{2/3}],$$

где  $\gamma_0$  — плотность при  $p=0$  Па, г/см<sup>3</sup>;  $p$  — избыточное давление, Па.

Теплопроводность жидкостей рассмотрена в [9, 11, 15, 16]. Экспериментальные данные собраны в [6, 13—15].

### 15.5. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теплопроводность твердых тел в подавляющем большинстве случаев обусловлена двумя механизмами: движением электронов проводимости (электронная теплопроводность) и тепловыми колебаниями атомов решетки (фононная теплопроводность). Первый механизм доминирует в металлах, второй определяет теплопроводность неметаллов. В некоторых полупроводниках, полуметаллах и сильно разупорядоченных сплавах оба механизма дают сравнимые вклады в теплопроводность.

При низких температурах теплопроводность твердого тела существенно зависит от количества и типа примесей, дефектов решетки. Это обусловлено тем, что при низких температурах электроны в металлах сильно рассеиваются на дефектах атомного масштаба, а фононы в диэлектриках — на дефектах с размерами несколько сотен межатомных расстояний. В совершенных диэлектрических кристаллах при температурах около 1 К длина свободного пробега фононов сравнима с размерами образца (обычно равна примерно 5 мм). В этом случае теплопроводность зависит от характера процессов рассеяния фононов на границах образца и его размеров.

При высоких температурах длины свободного пробега носителей ограничены в металлах в основном электрон-фононным рассеянием, в неметаллах — фонон-фононным. Поэтому при высоких температурах теплопроводность твердых тел слабо зависит от примесей и дефектов.

В аморфных диэлектриках в широком диапазоне температур длина свободного пробега фононов ограничена рассеянием на дефектах структуры. Теплопроводность аморфных тел значительно меньше, чем теплопроводность кристаллов. Поликристаллические тела обладают промежуточной теплопроводностью между теплопроводностями монокристаллов и аморфных тел.

Теплопроводность металлов и сплавов можно оценить, используя закон Видемана—Франца:

$$\lambda = L_0 \sigma T,$$

где  $L_0 = 2,445 \cdot 10^{-8}$  Вт·Ом/К<sup>2</sup> — число Лоренца;  $\sigma$  — электропроводность, (Ом·м)<sup>-1</sup>;  $T$  — температура, К. Для большинства металлов и сплавов закон Видемана—Франца справедлив при высоких и очень низких температурах. Для чистых металлов в области промежуточных температур этот закон дает завышенные значения  $\lambda$ . Для сплавов он дает заниженные значения теплопроводности (до 10 раз при температурах около 20 К для сильно разупорядоченных многокомпонентных сплавов).

В настоящей главе приведены теплопроводности некоторых технических сталей и сплавов (табл. 15.7—15.16), полупроводников (табл. 15.17), совершенных диэлектрических монокристаллов (табл. 15.18), стекол (табл. 15.19), огнеупорных материалов и высокотемпературных композиций ядерного топлива (табл. 15.20—15.24), строительных и теплоизоляционных материалов, древесины, горных пород и прочих веществ (табл. 15.25—15.29).

Теория теплопереноса в твердых телах и экспериментальные данные о теплопроводности рассмотрены в [17—20]. Введение в теорию теплопроводности твердых тел и жидкостей под давлением, методы измерений, экспериментальные данные обсуждаются в [21]. Большое количество данных о теплопроводности твердых тел приведено в справочниках [7, 22—25].

Таблица 15.1. Теплопроводности простейших химических веществ, Вт/(м·К) [4]

| Элемент                                                         | Т, К   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                 | 4      | 10     | 20     | 40     | 80     | 150    | 200    | 300    | 400    | 600    | 800    | 1000   |
| Азот газообразный [6]                                           | —      | —      | —      | —      | 0,0078 | 0,0139 | 0,0183 | 0,0257 | 0,0324 | 0,0446 | 0,0554 | 0,065  |
| Алюминий, $\rho_0=0,594 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                    | 15 700 | 23 500 | 11 700 | 2400   | 430    | 248    | 237    | 237    | 240    | 230    | 220    | 93ж    |
| Аргон газообразный [6]                                          | —      | —      | —      | —      | 0,006* | 0,0096 | 0,0126 | 0,0177 | 0,0222 | 0,0307 | 0,0374 | 0,0436 |
| Барий, $\rho_0=0,25 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                        | 39     | —      | —      | —      | —      | 21     | 19     | 18     | —      | —      | —      | —      |
| Бериллий поликристаллический, $\rho_0=13,5 \cdot 10^{-9}$ Ом·см | 720    | 1800   | 3500   | 4600   | 1600   | 450    | 300    | 200    | 160    | 126    | 106    | 91     |
| Бор поликристаллический                                         | 38     | 180    | 350    | 430    | 260    | 94     | 55     | 27     | 17     | 10,6   | 9,6    | 9,9    |
| Бром жидкий                                                     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 0,12   | —      | —      | —      | —      |
| Ванадий, $\rho_0=1,72 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                      | 5,6    | 14     | 26     | 39     | 39     | 32     | 31     | 30,7   | 31,3   | 33,3   | 36     | 36     |
| Висмут:                                                         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| поликристаллический                                             | —      | —      | 90     | 41     | 20,3   | 11,8   | 9,7    | 7,9    | 7,0    | 13     | 15     | 17     |
| тригональной оси                                                | —      | —      | 70     | 31     | 14,8   | 8,3    | 6,7    | 5,3    | 4,7    | —      | —      | —      |
| ⊥ тригональной оси                                              | 1700   | 290    | 100    | 47     | 23,0   | 13,6   | 11,2   | 9,2    | 8,2    | —      | —      | —      |
| Водород газообразный [6]                                        | —      | —      | 0,0158 | 0,0308 | 0,055  | 0,101  | 0,131  | 0,183  | 0,226  | 0,305  | 0,38   | 0,45   |
| Дейтерий газообразный [6]                                       | —      | —      | 0,0120 | 0,0262 | 0,049  | 0,081  | 0,101  | 0,133  | 0,163  | 0,216  | 0,27   | 0,32   |
| Вольфрам, $\rho_0=1,7 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                      | 5600   | 9700   | 4100   | 690    | 230    | 192    | 185    | 174    | 159    | 137    | 125    | 118    |
| Гадолиний:                                                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| поликристаллический, $\rho_0=3,71 \cdot 10^{-6}$ Ом·см          | 4,9    | 12     | 17     | 17     | 15     | 13     | 12     | 10,5   | —      | —      | —      | 16*2   |
| оси $c$ , $\rho_0=2,62 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                     | 5,9    | 14     | 17,5   | 16     | 14     | 12     | 11,2   | 10,8   | —      | 14,9*3 | 16,4*3 | 17,8*3 |
| ⊥ оси $c$ , $\rho_0=4,43 \times 10^{-6}$ Ом·см                  | 4,4    | 11     | 17     | 18     | 16     | 13,3   | 11,9   | 10,4   | —      | 12,3*4 | 14,3*4 | 16,3*4 |
| Галлий*5:                                                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| оси $a$ , $\rho_0=0,1 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                      | 9900   | 1200   | 270    | 80     | 50     | 44     | 42     | 41     | 34,5ж  | 46,2ж  | —      | —      |
| оси $b$ , $\rho_0=0,034 \times 10^{-9}$ Ом·см                   | 27 000 | 3300   | 1700   | 200    | 98     | 92     | 90     | 88     | —      | —      | —      | —      |
| оси $c$ , $\rho_0=0,425 \times 10^{-9}$ Ом·см                   | 3100   | 350    | 84     | 33     | 20     | 16,7   | 16,3   | 15,9   | —      | —      | —      | —      |
| Гафний поликристаллический, $\rho_0=4,23 \cdot 10^{-6}$ Ом·см   | 3,5    | 9,5    | 18     | 24     | 26     | 25     | 24     | 23,0   | 22,3   | 21,3   | 20,8   | 20,7   |
| Гелий газообразный [6]                                          | 0,0083 | 0,0171 | 0,0260 | 0,040  | 0,064  | 0,095  | 0,116  | 0,152  | 0,183  | 0,244  | 0,301  | 0,355  |
| Германий                                                        | 880    | 1800   | 1500   | 800    | 330    | 132    | 97     | 60     | 43     | 27     | 20     | 17     |
| Гольмий:                                                        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| поликристаллический, $\rho_0=2,67 \cdot 10^{-6}$ Ом·см          | 5,8    | 12     | 14     | 16     | 15     | 13,5   | 15     | 16     | 13,5*6 | 14*6   | 15*6   | 16,5*6 |
| оси $c$ , $\rho_0=3,21 \times 10^{-6}$ Ом·см                    | —      | 13     | 16     | 18     | 17     | 18     | 20     | 22     | —      | —      | —      | —      |
| ⊥ оси $c$ , $\rho_0=2,82 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                   | —      | 12     | 14     | 15     | 14     | 12     | 13     | 14     | —      | —      | —      | —      |
| Дистрозий:                                                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| поликристаллический, $\rho_0=4,93 \cdot 10^{-6}$ Ом·см          | 4,4    | 10     | 14     | 14     | 12     | 9,0    | 9,6    | 11     | 11     | 12     | 14     | 15     |

Продолжение табл. 15.

| Элемент                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Т, К                                                        |        |      |      |           |        |        |        |        |        |         |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|------|------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4                                                           | 10     | 20   | 40   | 80        | 150    | 200    | 300    | 400    | 600    | 800     | 1000   |
| оси $c$ , $\rho_0 = 5,77 \times 10^{-6}$ Ом·см<br>$\perp$ оси $c$ , $\rho_0 = 4,59 \times 10^{-6}$ Ом·см                                                                                                                                                                                                                                     | —                                                           | 4,4    | 12   | 12,4 | 11,7      | 8,7    | 10     | 12     | —      | —      | —       | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | —                                                           | 11     | 16   | 15   | 12        | 9,7    | 9,3    | 10     | —      | —      | —       | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2,5*7                                                       | —      | —    | —    | —         | 17     | 15     | 14     | —      | 10*8   | 11,5*8  | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 680                                                         | 1450   | 1540 | 620  | 175       | 104    | 94     | 80     | 70     | 55     | 43      | 32     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2100                                                        | 3200   | 1580 | 520  | 332       | 325    | 323    | 317    | 311    | 298    | 284     | 270    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5000                                                        | 590    | 190  | 109  | 99        | 94     | 90     | 82     | 75     | 43ж    | 48ж     | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\rho_0 = 0,587 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                        | —      | —    | —    | —         | —      | —      | 0,45г  | —      | 0,007г | 0,009г  | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Иод                                                         | —      | —    | —    | —         | —      | —      | —      | 147    | 138    | 132     | 126    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Иридий, $\rho_0 = 19,1 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                 | 520    | 1300 | 1900 | 750       | 210    | 160    | 153    | 144    | 144    | 138     | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Иттербий поликристаллический [29]                           | —      | —    | —    | —         | —      | 20     | 21     | 47     | —      | —       | —      |
| То же, $\rho$ (293 К)/ $\rho_0 = 4,9$ [30]                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | —                                                           | 12     | 13   | 11   | 10        | —      | —      | —      | —      | —      | —       | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Иттрий:                                                     |        |      |      |           |        |        |        |        |        |         |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | поликристаллический, $\rho_0 = 5,54 \cdot 10^{-6}$ Ом·см    | 2,7    | 7,0  | 13   | 15,2      | 15,7   | 16,4   | 16,6   | 17,2   | 21     | 23      | 25     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\parallel$ оси $c$ , $\rho_0 = 2,3 \times 10^{-6}$ Ом·см   | 5,3    | 13   | 23   | 24        | 24     | 25     | —      | —      | —      | —       | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\perp$ оси $c$ , $\rho_0 = 8,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см        | 1,9    | 5,0  | 9,4  | 12,1      | 12,7   | 13,3   | —      | —      | —      | —       | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Кадмий:                                                     |        |      |      |           |        |        |        |        |        |         |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | поликристаллический, $\rho_0 = 0,112 \cdot 10^{-9}$ Ом·см   | 30 000 | 1200 | 230  | 130       | 106    | 101    | 99     | 97     | 95     | 88*9    | 42ж    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\parallel$ оси $c$ , $\rho_0 = 0,134 \times 10^{-9}$ Ом·см | 26 000 | 1150 | 210  | 113       | 91     | 86     | 85     | 83     | 81     | 75*9    | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\perp$ оси $c$ , $\rho_0 = 0,103 \times 10^{-9}$ Ом·см     | 31 000 | 1250 | 240  | 140       | 113    | 108    | 106    | 104    | 101    | 94*9    | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Калий, $\rho_0 = 2,20 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                  | 1900   | 460  | 170  | 115       | 108    | 105    | 104    | 102    | 52ж    | 44ж     | 37ж    |
| Кальций, $\rho$ (273 К)/ $\rho_0 = 70$ [31]<br>Кислород газообразный [6]<br>Кобальт поликристаллический, $\rho_0 = 90,75 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Кремний<br>Криптон газообразный [6]<br>Ксенон газообразный [6]<br>Лантан поликристаллический, $\rho_0 = 1,29 \cdot 10^{-6}$ Ом·см<br>Литий, $\rho_0 = 37,2 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Лютеций: | —                                                           | —      | —    | 280  | 190       | 190    | 190    | 180    | —      | —      | —       | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | —                                                           | —      | —    | —    | 0,0074    | 0,0138 | 0,0183 | 0,0267 | 0,034  | 0,047  | 0,058   | 0,070  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 110                                                         | 260    | 440  | 380  | 190       | 140    | 122    | 100    | 85     | 67     | 58      | 52     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\rho_0 = 90,75 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                        | —      | —    | —    | —         | —      | —      | —      | —      | —      | —       | —      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 300                                                         | 2300   | 5000 | 3500 | 1340      | 410    | 260    | 150    | 99     | 62     | 42      | 31     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | —                                                           | —      | —    | —    | 0,0034*10 | 0,0050 | 0,0066 | 0,0096 | 0,0124 | 0,0174 | 0,0218  | 0,0256 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | —                                                           | —      | —    | —    | —         | —      | 0,0038 | 0,0057 | 0,0074 | 0,0106 | 0,0136  | 0,0163 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 8,8                                                         | 18     | 17   | 10   | 9,4       | 10,9   | 11,8   | 13,5   | 14,9   | 18     | 21      | 23     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Литий, $\rho_0 = 37,2 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                  | 260    | 610  | 720  | 340       | 120    | 95     | 90     | 85     | 80     | 48ж     | 54ж    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Лютеций:                                                    |        |      |      |           |        |        |        |        |        |         |        |
| поликристаллический, $\rho_0 = 1,45 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 7,9                                                         | 20     | 25   | 22   | 20        | 18     | 18     | 16     | —      | 13*11  | 14,5*11 |        |
| $\parallel$ оси $c$ , $\rho_0 = 0,76 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 16                                                          | 36     | 41   | 32   | 29        | 26     | 25     | 23     | —      | —      | —       |        |

Т, К

| Элемент                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 4                                                                                                                                                                                    | 10                                                                                                                                                                                 | 20                                                                                                                                                                           | 40                                                                                                                                                      | 80                                                                                                                                                          | 150                                                                                                                                                  | 200                                                                                                                                              | 300                                                                                                                                                  | 400                                                                                                                                           | 600                                                                                                                                        | 800                                                                                                                                       | 1000                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| оси $c$ , $\rho_0 = 2,65 \times 10^{-6}$ Ом·см<br>Магний поликристаллический,<br>$\rho_0 = 2,61 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Марганец, $\rho_0 = 11,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см<br>Медь, $\rho_0 = 0,589 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Молибден, $\rho_0 = 0,167 \cdot 10^{-6}$ Ом·см<br>Мышьяк<br>Натрий, $\rho_0 = 1,47 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Неодим поликристаллический<br>То же [32]<br>Неон газообразный [6]<br>Никель, $\rho_0 = 11,2 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Никобий, $\rho_0 = 67,9 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Олово:<br>поликристаллическое,<br>$\rho_0 = 0,132 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>   оси $c$ , $\rho_0 = 0,170 \times 10^{-9}$ Ом·см<br>⊥ оси $c$ , $\rho_0 = 0,118 \times 10^{-9}$ Ом·см<br>Осмий:<br>поликристаллический, $\rho_0 = 23,4 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>   оси $c$ , $\rho_0 = 16,7 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>⊥ оси $c$ , $\rho_0 = 27,8 \times 10^{-9}$ Ом·см<br>Палладий, $\rho_0 = 12,3 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Платина, $\rho_0 = 10,6 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Плутоний поликристаллический [33]<br>Прозодим поликристаллический<br>Прометий<br>Радий [23]<br>Рений поликристаллический,<br>$\rho_0 = 3,66 \cdot 10^{-9}$ Ом·см<br>Родий, $\rho_0 = 8,40 \cdot 10^{-9}$ Ом·см | 5,3<br>3800<br>0,96<br>16 200<br>61<br>—<br>4900<br>—<br>1,1<br>—<br>860<br>140<br>18 000<br>14 000<br>20 000<br>420<br>590<br>350<br>760<br>880<br>—<br>—<br>—<br>—<br>2500<br>1200 | 15<br>5600<br>1,6<br>24 000<br>150<br>—<br>2200<br>—<br>2,1<br>—<br>1800<br>290<br>1900<br>1500<br>2200<br>1020<br>1400<br>870<br>1150<br>1200<br>—<br>—<br>—<br>—<br>3600<br>2800 | 19<br>2700<br>2,4<br>10 800<br>290<br>—<br>610<br>—<br>3,5<br>—<br>1650<br>250<br>320<br>250<br>360<br>1600<br>2200<br>140<br>600<br>500<br>—<br>—<br>—<br>—<br>1200<br>3600 | 18<br>720<br>3,6<br>2170<br>360<br>—<br>190<br>—<br>—<br>—<br>580<br>95<br>130<br>104<br>150<br>640<br>—<br>—<br>170<br>140<br>—<br>—<br>—<br>—<br>1020 | 16<br>200<br>5,3<br>560<br>210<br>—<br>135<br>—<br>—<br>—<br>210<br>58<br>92<br>71<br>102<br>140<br>—<br>—<br>81<br>82<br>2,9<br>6,9<br>—<br>—<br>63<br>240 | 15<br>161<br>6,6<br>429<br>149<br>—<br>140<br>—<br>—<br>—<br>122<br>53<br>78<br>60<br>87<br>96<br>—<br>73<br>74<br>3,6<br>9,3<br>—<br>—<br>54<br>158 | 15<br>159<br>7,2<br>413<br>143<br>69<br>142<br>17<br>—<br>107<br>53<br>73<br>57<br>82<br>91<br>—<br>72<br>73<br>4,1<br>11<br>—<br>—<br>51<br>154 | 14<br>156<br>7,8<br>401<br>138<br>50<br>141<br>—<br>0,049<br>91<br>54<br>67<br>52<br>74<br>88<br>—<br>72<br>72<br>5,2<br>13<br>18<br>19<br>48<br>150 | —<br>153<br>—<br>393<br>134<br>41<br>87ж<br>17<br>—<br>80<br>55<br>62<br>48<br>69<br>87<br>—<br>74<br>73<br>7,3<br>14<br>18<br>—<br>46<br>146 | —<br>149<br>—<br>379<br>126<br>—<br>76ж<br>18<br>—<br>66<br>58<br>32ж<br>—<br>—<br>87<br>—<br>80<br>73<br>11<br>16<br>19<br>—<br>44<br>136 | —<br>146<br>12*12<br>366<br>118<br>—<br>67ж<br>20<br>—<br>68<br>61<br>36 ж<br>—<br>—<br>87<br>—<br>76<br>12<br>18<br>20<br>—<br>44<br>127 | —<br>84ж<br>14*12<br>352<br>112<br>—<br>58ж<br>22<br>—<br>72<br>64<br>41ж<br>—<br>—<br>87<br>—<br>79<br>—<br>22<br>21<br>—<br>45<br>121 |

Т, К

Элемент

| Элемент                                                                                                                                                                       | 4                     | 10                 | 20                | 40                 | 80                | 150                | 200                | 300                | 400             | 600                       | 800                           | 1000                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Ртуть:<br>поликристаллическая<br>   тригональной оси<br>— тригональной оси                                                                                                    | 230<br>280<br>200     | 46<br>58<br>40     | 40<br>50<br>35    | 36<br>45<br>32     | 33<br>40<br>29    | 30<br>36<br>27     | 29<br>34<br>26     | 8,3ж<br>—<br>—     | 9,8ж<br>—<br>—  | 12,0ж<br>—<br>—           | 12,8ж<br>—<br>—               | 11,7ж<br>—<br>—           |
| Рубидий, $\rho_0 = 38,4 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                                                                                                                                  | 190                   | 110                | 69                | 64                 | 61                | 59                 | 59                 | 58                 | 32ж             | 29ж                       | 25ж                           | 22ж                       |
| Рутений поликристаллический,<br>$\rho_0 = 15,8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                                                                                                           | 620                   | 1500               | 2300              | 950                | 190               | 128                | 118                | 117                | 114             | 108                       | 102                           | 98                        |
| Самарий поликристаллический,<br>$\rho_0 = 6,73 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                                                                                                           | 5,6*13                | 6,1                | 6,9               | 7,5                | 7,1               | 9,2                | 11                 | 13                 | 13              | 14                        | 16*14                         | —                         |
| Свинец, $\rho_0 = 0,682 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                                                                                                                                  | 2200                  | 180                | 59                | 45                 | 41                | 38                 | 37                 | 35                 | 34              | 31                        | 19ж                           | 22ж                       |
| Селен:<br>   оси $c$<br>— оси $c$<br>аморфный                                                                                                                                 | 140<br>27<br>0,032    | 140<br>36<br>0,042 | 59<br>17<br>0,056 | 26<br>7,4<br>0,079 | 13<br>3,6<br>0,13 | 7,6<br>2,2<br>0,20 | 6,1<br>1,7<br>0,26 | 4,5<br>1,3<br>0,53 | 5,4<br>1,5<br>— | —<br>—<br>—               | —<br>—<br>—                   | —<br>—<br>—               |
| Сера:<br>поликристаллическая<br>аморфная                                                                                                                                      | 10,6<br>—             | 8,2<br>—           | 2,4<br>—          | 1,1<br>—           | 0,65<br>0,16*1    | 0,43<br>0,175      | 0,36<br>0,185      | 0,27<br>0,206      | 0,13ж<br>—      | 0,17ж<br>—                | —<br>—                        | —<br>—                    |
| Серебро, $\rho_0 = 0,621 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                                                                                                                                 | 14 700                | 16 800             | 5100              | 1050               | 470               | 432                | 430                | 429                | 425             | 412                       | 396                           | 379                       |
| Скандий поликристаллический,<br>$\rho_0 = 10,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                                                                                                           | 2,8                   | 6,8                | 12                | 14                 | 14                | 15                 | 15,5*15            | 16*15              | 16,2*15         | 16,7*15                   | 17,2*15                       | 17,7*15                   |
| Стронций                                                                                                                                                                      | —                     | —                  | —                 | —                  | —                 | 45                 | 41                 | 35                 | 32              | 28                        | 28                            | 26                        |
| Сурьма поликристаллическая                                                                                                                                                    | 190                   | 480                | 240               | 110                | 55                | 36                 | 30                 | 24                 | 21              | 18                        | 17                            | 27ж                       |
| Таллий поликристаллический,<br>$\rho_0 = 0,240 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                                                                                                           | 1800                  | 190                | 81                | 65                 | 58                | 52                 | 49                 | 46                 | 44              | —                         | —                             | —                         |
| Тантал, $\rho_0 = 0,214 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                                                                                                                                  | 46                    | 107                | 140               | 87                 | 60                | 58                 | 58                 | 58                 | 58              | 59                        | 59                            | 60                        |
| Теллур:<br>   оси $c$<br>⊥ оси $c$                                                                                                                                            | 670<br>250            | 310<br>130         | 95<br>41          | 32<br>15           | 12,2<br>6,2       | 5,9<br>3,3         | 4,6<br>2,6         | 3,4<br>2,0         | 2,8<br>1,7      | 2,3<br>1,4                | 4,2ж<br>—                     | 6,5ж<br>—                 |
| Тербий:<br>поликристаллический,<br>$\rho_0 = 2,19 \cdot 10^{-6}$ Ом·см<br>   оси $c$ , $\rho_0 = 1,87 \cdot 10^{-6}$ Ом·см<br>⊥ оси $c$ , $\rho_0 = 2,37 \cdot 10^{-6}$ Ом·см | 8,4<br>18*13<br>11*13 | 19<br>26<br>16     | 23<br>29<br>20    | 19<br>23<br>17     | 15<br>19<br>14    | 12<br>15<br>11     | 10<br>13<br>9,0    | 11<br>15<br>9,6    | —<br>—<br>53    | 14,7*16<br>15*17<br>13*17 | 15,3*16<br>16,4*17<br>14,9*17 | 16,7*16<br>18*17<br>17*17 |
| Технеций поликристаллический [27]                                                                                                                                             | —                     | —                  | —                 | —                  | —                 | —                  | —                  | 55                 | 49              | 51                        | 51                            | 55                        |
| Титан поликристаллический,<br>$\rho_0 = 1,90 \cdot 10^{-6}$ Ом·см                                                                                                             | 5,8                   | 14                 | 28                | 39                 | 33                | 27                 | 25                 | 22                 | 20              | 19                        | 20                            | 21                        |

| Элемент                                                             | Т, К  |       |      |      |       |      |        |        |        |        |
|---------------------------------------------------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                     | 4     | 10    | 20   | 40   | 80    | 150  | 200    | 300    | 400    | 600    |
| Торий, $\rho_0 = 26,8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                          | 360   | 470   | 170  | 84   | 63    | 56   | 55     | 54     | 55     | 56     |
| Тулий:<br>поликристаллический, $\rho_0 = 1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·см   | 82    | 23    | 18   | 11   | 13    | 15   | 16     | 17     | —      | 15*18  |
| оси $c$ , $\rho_0 = 3,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·см                        | 14*13 | 21    | 14   | 10,5 | 19    | 22   | 23,5   | 24     | —      | —      |
| ⊥ оси $c$ , $\rho_0 = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·см                      | 14*13 | 24    | 20   | 11   | 10,5  | 12,6 | 13,4   | 14,1   | —      | —      |
| Углерод:<br>аморфный                                                | 0,016 | 0,071 | 0,16 | 0,31 | 0,56  | 0,94 | 1,2    | 1,6    | 1,9    | 2,2    |
| алмаз типа I                                                        | 11    | 140   | 790  | 2900 | 3500  | 6000 | 1400   | 900    | 650    | —      |
| алмаз типа IIa                                                      | 26    | 320   | 1700 | 6600 | 11700 | 6000 | 4000   | 2300   | 1500   | —      |
| алмаз типа IIb                                                      | 16    | 200   | 1100 | 4400 | 6600  | 3300 | 2300   | 1350   | 930    | —      |
| графит пироэлектрический:<br>   оси $c$                             | —     | 1,2   | 4,0  | 12   | 18    | 13   | 9,2    | 5,7    | 4,1    | 2,7    |
| ⊥ оси $c$                                                           | 10    | 81    | 420  | 1600 | 4300  | 4500 | 3200   | 2000   | 1400   | 890    |
| Уран поликристаллический,<br>$\rho_0 = 2,14 \cdot 10^{-8}$ Ом·см    | 4,4   | 9,8   | 16   | 18   | 21    | 24   | 25     | 28     | 30     | 34     |
| Фосфор:<br>черный поликристаллический                               | 0,51  | 6,5   | 27   | 44   | 35    | 23   | 18     | 12     | —      | —      |
| белый аморфный                                                      | —     | —     | —    | —    | —     | —    | 0,31   | 0,24   | 0,18ж  | —      |
| Фтор газообразный [6]                                               | —     | —     | —    | —    | —     | —    | 0,0134 | 0,027  | 0,035  | 0,049  |
| Хлор газообразный [6]                                               | —     | —     | —    | —    | —     | —    | 0,0054 | 0,0088 | 0,0124 | 0,0188 |
| Хром поликристаллический,<br>$\rho_0 = 60,8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см    | 160   | 390   | 590  | 430  | 180   | 129  | 111    | 94     | 91     | 81     |
| Цезий, $\rho_0 = 41,8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см                          | 110   | 69    | 55   | 47   | 41    | 38   | 37     | 36     | 20ж    | 21ж    |
| Церий, $\rho(293 \text{ K})/\rho(20 \text{ K}) = 1,93$              | 0,48  | 1,1   | 1,9  | 3,2  | 5,2   | 7,7  | 9,0    | 11     | 13     | 17     |
| Цинк поликристаллический,<br>$\rho_0 = 1,28 \cdot 10^{-9}$ Ом·см    | 7100  | 4700  | 1000 | 280  | 130   | 117  | 118    | 116    | 111    | 103    |
| Цирконий поликристаллический,<br>$\rho_0 = 218 \cdot 10^{-9}$ Ом·см | 44    | 100   | 110  | 59   | 37    | 28   | 25     | 23     | 22     | 21     |
| Эрбий:<br>поликристаллический                                       | 3,6   | 7,1   | 7,8  | 9,3  | 11    | 13,7 | 14,6   | 14,3   | 14     | 14     |
| оси $c$                                                             | —     | 7,2   | 6,4  | 8,6  | 12    | 17,4 | 18,5   | 18,4   | —      | —      |
| ⊥ оси $c$                                                           | —     | 7,0   | 8,6  | 9,6  | 10    | 12   | 12,6   | 12,6   | —      | —      |

Примечание. Знак (.) означает, что приведенное значение теплопроводности относится к направлению, параллельному (перпендикулярному) указанной оси.

\*1  $T = 90 \text{ K}$ ,  
\*2  $\rho(300 \text{ K}) = 130 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [26],  
\*3  $\rho(300 \text{ K}) = 127 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [27],  
\*4  $\rho(300 \text{ K}) = 136 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [27].  
\*5 Значения  $\lambda$  для поликристаллического гафния близки к значениям  $\lambda$  для монокристалла в направлении оси  $a$ .  
\*6  $\rho(300 \text{ K}) = 90 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [27].  
\*7 Данные из [28].

Сокращения: г — газовая фаза, ж — жидкая фаза; т — твердая фаза.

\*8  $\rho(300 \text{ K}) = 86 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [27].  
\*9  $T = 294,258 \text{ K}$  — точка плавления.  
\*10  $T = 100 \text{ K}$ .  
\*11  $\rho(300 \text{ K}) = 65 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [27].  
\*12  $\rho(300 \text{ K}) = 165 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [26].  
\*13  $T = 6 \text{ K}$ .  
\*14 Данные из [34].  
\*15  $\rho(300 \text{ K}) = 52 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [27].  
\*16  $\rho(300 \text{ K}) = 129 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [26].  
\*17  $\rho(300 \text{ K}) = 98 \cdot 10^{-9}$  Ом·см.  
\*18  $\rho(300 \text{ K}) = 127 \cdot 10^{-9}$  Ом·см [27].

Таблица 15.2. Теплопроводности неорганических газов при атмосферном давлении [6, 14]

| $T, K$                     | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ | $T, K$                            | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Азота закись</i> $N_2O$ |                                     | <i>Сера шестифтористая</i> $SF_6$ |                                     |
| 200                        | 9,75                                | 200                               | 4,53                                |
| 250                        | 13,4                                | 300                               | 13,2                                |
| 300                        | 17,3                                | 400                               | 20,3                                |
| 400                        | 25,3                                | 600                               | 32,7                                |
| 600                        | 41,1                                | 800                               | 43,2                                |
| 700                        | 48,1                                | 1000                              | 54,0                                |
| <i>Азота оксид</i> $NO$    |                                     | <i>Сероводород</i> $H_2S$         |                                     |
| 120                        | 10,2                                | 180                               | 3,36                                |
| 200                        | 17,6                                | 200                               | 6,08                                |
| 300                        | 25,9                                | 250                               | 11,2                                |
| 400                        | 33,6                                | 300                               | 14,8                                |
| 600                        | 47,8                                | 400                               | 20,3                                |
| 800                        | 62,7                                | 600                               | 34,4                                |
| 900                        | 71,2                                | <i>Серы диоксид</i> $SO_2$        |                                     |
| <i>Аммиак</i> $NH_3$       |                                     | 270                               | 8,19                                |
| 200                        | 13,3                                | 300                               | 9,70                                |
| 300                        | 24,4                                | 400                               | 14,8                                |
| 400                        | 37,4                                | 600                               | 25,3                                |
| 600                        | 66,8                                | 800                               | 35,7                                |
| 800                        | 98,5                                | 1000                              | 45,7                                |
| <i>Водяной пар</i> $H_2O$  |                                     | 1200                              | 54,8                                |
| 373                        | 25,1                                | 1370                              | 61,6                                |
| 473                        | 33,3                                | <i>Углерода диоксид</i> $CO_2$    |                                     |
| 573                        | 43,4                                | 200                               | 9,38                                |
| 673                        | 54,8                                | 300                               | 16,6                                |
| 773                        | 67,0                                | 400                               | 24,3                                |
| 873                        | 79,9                                | 600                               | 40,7                                |
| 973                        | 93,4                                | 800                               | 55,1                                |
| 1073                       | 107                                 | 1000                              | 68,2                                |
| <i>Водяной пар</i> $D_2O$  |                                     | 1200                              | 80,3                                |
| 373                        | 24,8                                | 1400                              | 92,1                                |
| 473                        | 33,9                                | <i>Углерода оксид</i> $CO$        |                                     |
| 573                        | 44,2                                | 80                                | 6,91                                |
| 673                        | 56,1                                | 100                               | 8,71                                |
| 773                        | 69,7                                | 150                               | 13,2                                |
| 823                        | 76,9                                | 200                               | 17,4                                |
| <i>Воздух</i>              |                                     | 300                               | 24,9                                |
| 80                         | 7,5                                 | 400                               | 31,9                                |
| 100                        | 9,3                                 | 600                               | 45,0                                |
| 150                        | 13,8                                | 800                               | 57,0                                |
| 200                        | 18,0                                | 1000                              | 68,3                                |
| 300                        | 26,2                                | 1200                              | 79,2                                |
| 400                        | 33,8                                | 1400                              | 90,0                                |
| 600                        | 46,9                                | 1500                              | 95,4                                |
| 800                        | 57,3                                |                                   |                                     |
| 1000                       | 66,7                                |                                   |                                     |
| 1200                       | 76,3                                |                                   |                                     |

Таблица 15.3. Теплопроводности органических газов при атмосферном давлении [6]

| $T, K$                      | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ | $T, K$                                | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Ацетон</i> $CH_3COCH_3$  |                                     | <i>н-Октан</i> $C_8H_{18}$            |                                     |
| 300                         | 11,2                                | 420                                   | 22,2                                |
| 350                         | 15,7                                | 450                                   | 25,4                                |
| 400                         | 20,4                                | 500                                   | 31,1                                |
| 450                         | 25,3                                | 600                                   | 43,7                                |
| 480                         | 28,3                                | <i>н-Пентан</i> $C_5H_{12}$           |                                     |
| <i>Бензол</i> $C_6H_6$      |                                     | 320                                   | 16,6                                |
| 320                         | 11,9                                | 350                                   | 20,0                                |
| 350                         | 14,7                                | 400                                   | 26,0                                |
| 400                         | 19,7                                | 450                                   | 32,5                                |
| 450                         | 24,8                                | 470                                   | 35,2                                |
| 500                         | 30,2                                | <i>Пропан</i> $C_3H_8$                |                                     |
| 600                         | 41,0                                | 260                                   | 13,5                                |
| 660                         | 47,8                                | 300                                   | 18,2                                |
| <i>н-Бутан</i> $C_4H_{10}$  |                                     | 400                                   | 31,1                                |
| 280                         | 13,8                                | 500                                   | 45,9                                |
| 300                         | 16,1                                | 600                                   | 62,6                                |
| 350                         | 22,1                                | 700                                   | 81,3                                |
| 400                         | 28,4                                | 800                                   | 101                                 |
| 450                         | 35,2                                | <i>Пропилен</i> $C_3H_6$              |                                     |
| 500                         | 42,4                                | 230                                   | 10,9                                |
| 570                         | 53,3                                | 250                                   | 12,5                                |
| <i>н-Гексан</i> $C_6H_{14}$ |                                     | 300                                   | 17,6                                |
| 360                         | 19,1                                | 350                                   | 23,5                                |
| 400                         | 23,6                                | 400                                   | 30,0                                |
| 450                         | 29,5                                | 450                                   | 36,7                                |
| 500                         | 36,0                                | 500                                   | 43,5                                |
| 600                         | 50,0                                | 600                                   | 57,9                                |
| 630                         | 54,5                                | <i>Спирт н-амиловый</i> $C_5H_{11}OH$ |                                     |
| <i>н-Гептан</i> $C_7H_{16}$ |                                     | 420                                   | 23,6                                |
| 380                         | 19,6                                | 450                                   | 26,7                                |
| 400                         | 21,7                                | 500                                   | 32,6                                |
| 450                         | 27,4                                | 600                                   | 47,2                                |
| 500                         | 33,5                                | <i>Спирт изопропиловый</i> $C_3H_7OH$ |                                     |
| 600                         | 46,6                                | 400                                   | 25,4                                |
| 630                         | 51,0                                | 450                                   | 31,0                                |
| <i>н-Ксилол</i> $C_8H_{10}$ |                                     | 500                                   | 37,3                                |
| 450                         | 24,0                                | 560                                   | 45,4                                |
| 500                         | 29,7                                | <i>Спирт метиловый</i> $CH_3OH$       |                                     |
| 600                         | 41,2                                | 380                                   | 23,8                                |
| 700                         | 52,7                                | 400                                   | 26,1                                |
| <i>Метан</i> $CH_4$         |                                     | 450                                   | 31,6                                |
| 120                         | 12,8                                | 500                                   | 37,5                                |
| 150                         | 16,2                                | 570                                   | 46,8                                |
| 200                         | 21,8                                | <i>Спирт этиловый</i> $C_2H_5OH$      |                                     |
| 300                         | 34,2                                | 400                                   | 25,8                                |
| 400                         | 49,3                                | 450                                   | 31,6                                |
| 500                         | 68,0                                | 500                                   | 37,8                                |
| 600                         | 88,8                                | 570                                   | 47,2                                |
| 700                         | 109                                 |                                       |                                     |
| 750                         | 118                                 |                                       |                                     |



| $T, K$                                             | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ | $T, K$                                          | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Толуол <math>C_7H_8</math></b>                  |                                     | <b>Фреон-22 <math>CHF_2Cl</math></b>            |                                     |
| 380                                                | 16,5                                | 250                                             | 8,0                                 |
| 400                                                | 18,7                                | 300                                             | 10,6                                |
| 450                                                | 24,5                                | 350                                             | 14,2                                |
| 500                                                | 30,2                                | 400                                             | 16,6                                |
| 600                                                | 41,7                                |                                                 |                                     |
| 700                                                | 53,6                                |                                                 |                                     |
| <b>Углерод четырехфтористый <math>CF_4</math></b>  |                                     | <b>Циклогексан <math>C_6H_{12}</math></b>       |                                     |
| 200                                                | 8,98                                | 380                                             | 19,2                                |
| 250                                                | 12,6                                | 400                                             | 21,7                                |
| 300                                                | 16,5                                | 450                                             | 28,0                                |
| 350                                                | 20,4                                | 500                                             | 35,0                                |
| 400                                                | 24,2                                | 600                                             | 51,0                                |
| 450                                                | 27,8                                | 630                                             | 56,4                                |
| 500                                                | 31,2                                |                                                 |                                     |
| 600                                                | 37,5                                |                                                 |                                     |
| 700                                                | 43,5                                |                                                 |                                     |
| <b>Углерод четыреххлористый <math>CCl_4</math></b> |                                     | <b>Этан <math>C_2H_6</math></b>                 |                                     |
| 300                                                | 6,71                                | 200                                             | 11,4                                |
| 350                                                | 8,34                                | 250                                             | 15,6                                |
| 400                                                | 9,95                                | 300                                             | 21,4                                |
| 450                                                | 11,6                                | 350                                             | 28,5                                |
| 500                                                | 13,2                                | 400                                             | 36,1                                |
| 600                                                | 16,4                                | 450                                             | 44,3                                |
|                                                    |                                     | 500                                             | 53,0                                |
|                                                    |                                     | 600                                             | 71,5                                |
|                                                    |                                     | 700                                             | 90,7                                |
| <b>Фреон-11 <math>CFCl_3</math></b>                |                                     | <b>Этил хлористый <math>C_2H_5Cl</math></b>     |                                     |
| 300                                                | 8,7                                 | 260                                             | 8,85                                |
| 350                                                | 10,7                                | 300                                             | 11,6                                |
| 400                                                | 12,7                                | 350                                             | 15,3                                |
| 450                                                | 14,7                                | 400                                             | 19,4                                |
| 500                                                | 16,4                                | 450                                             | 23,8                                |
|                                                    |                                     | 500                                             | 28,6                                |
|                                                    |                                     | 540                                             | 32,7                                |
| <b>Фреон-12 <math>CF_2Cl_2</math></b>              |                                     | <b>Этилен <math>C_2H_4</math></b>               |                                     |
| 250                                                | 8,0                                 | 180                                             | 9,7                                 |
| 300                                                | 10,2                                | 200                                             | 11,0                                |
| 350                                                | 12,4                                | 250                                             | 15,2                                |
| 400                                                | 15,0                                | 300                                             | 20,6                                |
| 450                                                | 17,5                                | 350                                             | 27,0                                |
|                                                    |                                     | 400                                             | 34,2                                |
|                                                    |                                     | 450                                             | 42,4                                |
|                                                    |                                     | 500                                             | 51,0                                |
|                                                    |                                     | 600                                             | 66,2                                |
| <b>Фреон-13 <math>CF_3Cl</math></b>                |                                     | <b>Этилформиат <math>HCOOC_2H_5</math></b>      |                                     |
| 250                                                | 9,4                                 | 350                                             | 16,9                                |
| 300                                                | 12,5                                | 400                                             | 22,7                                |
| 350                                                | 15,6                                | 450                                             | 29,0                                |
| 400                                                | 18,6                                | 500                                             | 36,8                                |
| 450                                                | 21,7                                | 600                                             | 58,0                                |
| <b>Фреон-21 <math>CHFCl_2</math></b>               |                                     | <b>Эфир диэтиловый <math>(C_2H_5)_2O</math></b> |                                     |
| 300                                                | 9,0                                 | 350                                             | 19,9                                |
| 350                                                | 11,5                                | 400                                             | 25,9                                |
| 400                                                | 14,0                                | 450                                             | 31,5                                |
| 450                                                | 16,4                                | 500                                             | 36,7                                |

| Газ                        | $T, K$  | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)} \text{ при } p, 10^5 \text{ Па}$ |       |      |      |      |
|----------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|
|                            |         | 1                                                                   | 100   | 300  | 500  | 1000 |
| Азот $N_2$                 | 100     | 9,58                                                                | 108   | 129  | 145  | —    |
|                            | 150     | 13,9                                                                | —     | 83,6 | 101  | —    |
|                            | 200     | 18,3                                                                | 29,4  | 58,9 | 78,1 | —    |
|                            | 300     | 25,7                                                                | 30,8  | 44,6 | 57,9 | 84,6 |
|                            | 400     | 32,4                                                                | 35,6  | 44,5 | 53,8 | 74,1 |
|                            | 600     | 44,6                                                                | 46,3  | 51,8 | 57,1 | 70,3 |
|                            | 800     | 55,4                                                                | 56,7  | 60,6 | 64,5 | 74,4 |
|                            | 1000    | 65,4                                                                | 66,6  | 70,0 | 72,9 | 80,2 |
| Аммиак $NH_3$              | 1400    | 84,4                                                                | 85,2  | 86,8 | 88,7 | 94,7 |
|                            | 200     | 13,2                                                                | 658   | 662  | —    | —    |
|                            | 300     | 24,4                                                                | 479   | 501  | —    | —    |
|                            | 400     | 37,4                                                                | 123   | 321  | —    | —    |
| Аргон $Ar$                 | 600     | 66,8                                                                | 76,9  | 108  | —    | —    |
|                            | 100     | 6,6                                                                 | 118   | 131  | —    | —    |
|                            | 150     | 9,6                                                                 | 61,5  | 84,3 | 98,6 | —    |
|                            | 200     | 12,6                                                                | 23,5  | 55,0 | 70,9 | —    |
|                            | 300     | 17,7                                                                | 22,5  | 34,8 | 47,0 | 69,6 |
|                            | 400     | 22,2                                                                | 25,4  | 33,0 | 41,5 | 59,2 |
| Водород нормальный $n-H_2$ | 600     | 30,7                                                                | 32,9  | 36,7 | 41,4 | 52,8 |
|                            | 800     | 37,4                                                                | 39,0  | 42,0 | 45,3 | 53,7 |
|                            | 1000    | 43,6                                                                | 44,9  | 47,2 | 49,7 | 56,2 |
|                            | 20      | 100*1                                                               | 124   | —    | —    | —    |
|                            | 50      | 37,2                                                                | 110   | 177  | 231  | —    |
| Водяной пар $H_2O$         | 100     | 67,7                                                                | 93,1  | 142  | 179  | —    |
|                            | 150     | 101                                                                 | 117   | 148  | 176  | —    |
|                            | 200     | 131                                                                 | 143   | 165  | 186  | —    |
|                            | 300     | 183                                                                 | 191   | 205  | 219  | —    |
|                            | 400     | 225                                                                 | 231   | 242  | 252  | —    |
|                            | 500     | 266                                                                 | 271   | 280  | 288  | —    |
|                            | 273,15  | 561*1                                                               | 566*1 | 577  | 588  | 612  |
|                            | 373,15  | 25,1                                                                | 684*1 | 695  | 706  | 732  |
|                            | 473,15  | 33,3                                                                | 671*1 | 688  | 704  | 741  |
|                            | 573,15  | 43,4                                                                | 551*1 | 589  | 619  | 675  |
| Воздух                     | 673,15  | 54,8                                                                | 67,9  | 331  | 451  | 548  |
|                            | 773,15  | 67,0                                                                | 75,6  | 114  | 203  | 395  |
|                            | 873,15  | 79,9                                                                | 87,1  | 112  | 152  | 272  |
|                            | 973,15  | 93,4                                                                | 100   | 121  | 151  | 236  |
|                            | 1073,15 | 107                                                                 | 113   | 131  | 156  | 225  |
|                            | 100     | 9,3                                                                 | 124   | 143  | 158  | —    |
|                            | 150     | 13,8                                                                | 53,6  | 92,3 | 113  | —    |
|                            | 200     | 18,0                                                                | 29,4  | 61,9 | 82,8 | —    |
| Гелий $He$                 | 300     | 26,2                                                                | 31,4  | 45,6 | 59,0 | 87,9 |
|                            | 400     | 33,8                                                                | 37,3  | 46,4 | 55,4 | 76,9 |
|                            | 600     | 46,9                                                                | 49,0  | 54,3 | 59,8 | 72,9 |
|                            | 800     | 57,3                                                                | 58,8  | 62,4 | 66,4 | 75,9 |
|                            | 20      | 26,0                                                                | 60,0  | 99,0 | 136  | —    |
|                            | 50      | 46,6                                                                | 64,1  | 95,6 | 121  | —    |
|                            | 100     | 73,3                                                                | 86,3  | 110  | 130  | —    |
|                            | 150     | 95,1                                                                | 104   | 118  | 137  | —    |
|                            | 200     | 116                                                                 | 123   | 135  | 147  | —    |
|                            | 300     | 152                                                                 | 157   | 165  | 173  | 194  |
|                            | 400     | 183                                                                 | 186   | 193  | 199  | 216  |
|                            | 600     | 244                                                                 | 246   | 251  | 255  | 266  |
|                            | 800     | 301                                                                 | 303   | 306  | 309  | 318  |
|                            | 1000    | 355                                                                 | 356   | 359  | 362  | 369  |
|                            | 1500    | 475                                                                 | 476   | 478  | 480  | 485  |

| Газ                           | T, К | $\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К) при $p, 10^6$ Па |      |      |      |       |
|-------------------------------|------|----------------------------------------------|------|------|------|-------|
|                               |      | 1                                            | 100  | 300  | 500  | 1000  |
| Кислород $O_2$                | 100  | 9,25                                         | 142  | 153  | 161  | —     |
|                               | 150  | 13,8                                         | 81,2 | 105  | 117  | —     |
|                               | 200  | 18,3                                         | 33,4 | 71,3 | 89,5 | —     |
|                               | 300  | 26,7                                         | 32,7 | 50,1 | 63,1 | —     |
|                               | 400  | 34,1                                         | 39,1 | 49,2 | 59,5 | —     |
|                               | 600  | 46,8                                         | 48,7 | 55,6 | 62,0 | —     |
|                               | 800  | 58,3                                         | 60,7 | 65,7 | 69,5 | —     |
|                               | 1000 | 69,5                                         | 70,3 | 73,5 | 77,7 | —     |
|                               | 1400 | 91,3                                         | 91,8 | 93,8 | 95,9 | —     |
| Метан $CH_4$                  | 100  | 212*1                                        | 222  | 237  | 249  | —     |
|                               | 150  | 61,2                                         | 150  | 173  | 194  | —     |
|                               | 200  | 21,8                                         | —    | 126  | 144  | —     |
|                               | 300  | 34,2                                         | 44,7 | 74,0 | 96,0 | 136   |
|                               | 400  | 49,3                                         | 55,8 | 72,3 | 88,0 | 118   |
|                               | 600  | 88,8                                         | 92,6 | 102  | 110  | 131   |
|                               | 750  | 118                                          | 121  | 127  | 135  | 151   |
| Углерода<br>диоксид<br>$CO_2$ | 300  | 16,6                                         | 87,4 | 118  | 137  | 171   |
|                               | 400  | 24,3                                         | 30,9 | 60,9 | 83,3 | 119,5 |
|                               | 600  | 40,7                                         | 43,7 | 53,2 | 64,1 | 87,3  |
|                               | 800  | 55,1                                         | 57,3 | 63,2 | 69,8 | 85,6  |
|                               | 1000 | 68,2                                         | 69,8 | 74,1 | 78,8 | 90,6  |
| Фреон-14<br>$CF_4$            | 200  | 8,98                                         | 62,2 | 74,8 | 87,6 | —     |
|                               | 300  | 16,5                                         | 29,0 | 51,0 | 62,0 | —     |
|                               | 400  | 24,2                                         | 30,9 | 48,5 | 59,9 | —     |
| Этан $C_2H_6$                 | 200  | 11,4                                         | 171  | 186  | 198  | —     |
|                               | 300  | 21,4                                         | —    | 111  | 130  | —     |
|                               | 400  | 36,1                                         | 48,3 | 81,8 | 102  | 135   |
|                               | 600  | 71,5                                         | 75,3 | 87,7 | 99,7 | 124   |
| Этилен $C_2H_4$               | 150  | 211*1                                        | 222  | 233  | 244  | —     |
|                               | 200  | 11,0                                         | 166  | 188  | 205  | —     |
|                               | 300  | 20,6                                         | 69,1 | 107  | 129  | —     |
|                               | 400  | 34,2                                         | 45,0 | 77,1 | 97,3 | —     |

\*1 Жидкость при давлении ниже критического.

Таблица 15.5. Теплопроводности жидкостей на линии насыщения [6, 14]

| T, К          | $\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К) | T, К                | $\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К) |
|---------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Азот $N_2$    |                             | Аргон Ar            |                             |
| 65            | 160                         | 85                  | 126                         |
| 70            | 151                         | 90                  | 120                         |
| 80            | 132                         | 100                 | 108                         |
| 90            | 114                         | 110                 | 96,3                        |
| 100           | 96,6                        | 120                 | 84,2                        |
| 110           | 79,5                        | 130                 | 71,8                        |
| 120           | 62,8                        | 140                 | 59,2                        |
| 125           | 52,0                        | 150                 | 40,4                        |
| Аммиак $NH_3$ |                             | Ацетон $CH_3COCH_3$ |                             |
| 200           | 657                         | 200                 | 197                         |
| 250           | 562                         | 250                 | 178                         |
| 300           | 467                         | 300                 | 159,5                       |
| 350           | 360                         | 350                 | 140,5                       |
| 400           | 230                         | 400                 | 122                         |
|               |                             | 450                 | 103                         |
|               |                             | 500                 | 84                          |

| T, К                   | $\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К) | T, К                          | $\lambda, 10^{-3}$ Вт/(м·К) |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Бензол $C_6H_6$        |                             | Кислород $O_2$                |                             |
| 290                    | 148                         | 90                            | 148                         |
| 300                    | 143                         | 100                           | 135                         |
| 350                    | 128,5                       | 110                           | 122                         |
| 400                    | 113,5                       | 120                           | 109                         |
| 450                    | 99                          | 130                           | 95,1                        |
|                        |                             | 140                           | 82,0                        |
|                        |                             | 150                           | 65,3                        |
| Вода $H_2O$            |                             | Спирт метиловый $CH_3OH$      |                             |
| 273,15                 | 561                         | 180                           | 243                         |
| 323,15                 | 644                         | 200                           | 236                         |
| 373,15                 | 679                         | 250                           | 218                         |
| 423,15                 | 682                         | 300                           | 202                         |
| 473,15                 | 663                         | 350                           | 188                         |
| 523,15                 | 622                         | 400                           | 176                         |
| 573,15                 | 548                         | 450                           | 167                         |
| 623,15                 | 445                         | 480                           | 162                         |
| 643,15                 | 424                         |                               |                             |
| Вода тяжелая $D_2O$    |                             | Спирт n-пропиловый $C_3H_7OH$ |                             |
| 277,15                 | 568                         | 150                           | 182,5                       |
| 323,15                 | 620                         | 200                           | 176                         |
| 373,15                 | 640                         | 250                           | 166                         |
| 423,15                 | 631                         | 300                           | 154                         |
| 473,15                 | 596                         | 350                           | 144                         |
| 523,15                 | 541                         | 400                           | 136                         |
| 573,15                 | 478                         | 450                           | 128                         |
| 623,15                 | 378                         | 480                           | 124                         |
| n-Водород $H_2$        |                             | Спирт этиловый $C_2H_5OH$     |                             |
| 16                     | 85,0                        | 160                           | 207                         |
| 18                     | 95,0                        | 180                           | 202                         |
| 20                     | 100                         | 200                           | 196                         |
| 22                     | 103                         | 250                           | 180                         |
| 24                     | 104                         | 300                           | 166                         |
| 26                     | 102                         | 350                           | 153                         |
| 28                     | 97,6                        | 400                           | 143                         |
| 30                     | 92,8                        | 420                           | 140                         |
| 32                     | 83,7                        |                               |                             |
| Гелий I He I           |                             | m-Терфенил $C_{16}H_{14}$     |                             |
| 2,5                    | 19,1                        | 350                           | 136,5                       |
| 3,0                    | 20,3                        | 400                           | 133                         |
| 3,5                    | 23,2                        | 450                           | 130                         |
| 4,0                    | 28,1                        | 480                           | 128                         |
| 4,5                    | 34,8                        |                               |                             |
| 5,0                    | 43,4                        | Толуол $C_7H_8$ *1            |                             |
| Глицерин $C_3H_8O_3$   |                             | 180                           | 159,5                       |
| 280                    | 282                         | 200                           | 157                         |
| 300                    | 288                         | 250                           | 145                         |
| 400                    | 300                         | 300                           | 132,5                       |
| 500                    | 315                         | 350                           | 120                         |
| Дифенил $C_{12}H_{10}$ |                             | 400                           | 108                         |
| 350                    | 137                         | 450                           | 97                          |
| 400                    | 130                         | 500                           | 85,5                        |
| 450                    | 123                         | 550                           | 76,5                        |
| 500                    | 116                         | 570                           | 73,5                        |
| 550                    | 109                         |                               |                             |
| 580                    | 105                         |                               |                             |

Продолжение табл. 15.5

| $T, K$                                                         | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ | $T, K$                                                     | $\lambda, 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$ |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Углерод четыреххлористый <math>\text{CCl}_4^{*1}</math></b> |                                     | <b>Фреон-21 <math>\text{CHFCl}_2</math></b>                |                                     |
| 250                                                            | 113,7                               | 203                                                        | 134                                 |
| 300                                                            | 102,7                               | 223                                                        | 127                                 |
| 350                                                            | 91,5                                | 273                                                        | 109                                 |
| 400                                                            | 80,4                                | 323                                                        | 92,0                                |
| 450                                                            | 69,5                                | 373                                                        | 75,5                                |
| 470                                                            | 65,1                                |                                                            |                                     |
| <b>Углерода диоксид <math>\text{CO}_2</math></b>               |                                     | <b>Фреон-22 <math>\text{CHF}_2\text{Cl}</math></b>         |                                     |
| 220                                                            | 181                                 | 123                                                        | 163                                 |
| 250                                                            | 140                                 | 173                                                        | 143                                 |
| 270                                                            | 113                                 | 223                                                        | 119                                 |
| 290                                                            | 90,0                                | 273                                                        | 96,5                                |
| 295                                                            | 86,0                                | 323                                                        | 75,2                                |
| 300                                                            | 85,0                                | 353                                                        | 62,6                                |
| <b>Фреон-11 <math>\text{CFCI}_3</math></b>                     |                                     | <b>Этиленгликоль <math>(\text{CH}_2\text{OH})_2</math></b> |                                     |
| 173                                                            | 120                                 | 280                                                        | 250                                 |
| 223                                                            | 108                                 | 300                                                        | 254                                 |
| 273                                                            | 96,1                                | 350                                                        | 260,5                               |
| 323                                                            | 83,9                                | 400                                                        | 260                                 |
| 373                                                            | 72,0                                | 450                                                        | 254,5                               |
| 413                                                            | 63,0                                |                                                            |                                     |
| <b>Фреон-12 <math>\text{CF}_2\text{Cl}_2</math></b>            |                                     |                                                            |                                     |
| 123                                                            | 129                                 |                                                            |                                     |
| 173                                                            | 112                                 |                                                            |                                     |
| 223                                                            | 93,1                                |                                                            |                                     |
| 273                                                            | 76,0                                |                                                            |                                     |
| 323                                                            | 62,0                                |                                                            |                                     |
| 353                                                            | 53,7                                |                                                            |                                     |

\*1 Рекомендованы в [6] в качестве образцовых веществ.

Таблица 15.6. Теплопроводности масел и некоторых продуктов перегонки нефти [13, 15]

| Вещество             | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \text{ Вт/(м·К)}^{*1}$ |
|----------------------|---------------------|----------------------------------|
| Бензин Б-70 (жидкий) | -50...50...200      | 0,13...0,11...0,080              |
| Вазелин              | 25                  | 0,18                             |
| Газолин              | 30                  | 0,14                             |
| Керосин Т-1 (жидкий) | -50...50...300      | 0,13...0,11...0,074              |
| Масло:               |                     |                                  |
| касторовое           | 20                  | 0,18                             |
| оливковое            | 20                  | 0,17                             |
| парафиновое          | 30                  | 0,12                             |
| трансформаторное     | -50...50...100      | 0,12...0,11...0,10               |
| (ГОСТ 982-80)        |                     |                                  |
| АМГ-10               | 20...100            | 0,12...0,11                      |
| ВМ-4                 | -30...100           | 0,13...0,12                      |
| МС-20                | 0...150             | 0,14...0,12                      |
| ТМ-1                 | -50...100           | 0,125...0,11                     |
| ХФ-22                | -50...100           | 0,17...0,14                      |
| Парафин              | 30                  | 0,12                             |
| Топливо дизельное    | 20...100            | 0,12...0,11                      |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.7. Теплопроводности сталей [22, 23]

| Марка стали (массовый состав) *1                                                                          | $T, K$                                            | $\lambda^{*2}, \text{ Вт/(м·К)}$                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Железо Армко зарубежного производства, хорошо отожженное, $\rho_0 = 0,69 \cdot 10^{-6} \text{ Ом·см}$ [4] | 10...20...40...80...150...<br>...300...600...1000 | 36,2...71,2...113...105...<br>...85,5...72,7...53,1...32,3 |
| Железо Армко *3, $\rho$ (296 К) = $14,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом·см}$ [35]                                 | 300...600...1000...1183...1673                    | 71...52...32...32...38                                     |
| Ст. 0,8*4 (0,065С; 0,4 Мн)                                                                                | 300...600...900                                   | 88...58...33                                               |
| Ст. 10*4 (0,1 С; 0,4 Мн; 0,17—0,37 Si)                                                                    | 300...600...800                                   | 83...57...44                                               |
| Ст. 15*4 (0,15 С; 0,35—0,65 Мн; 0,17—0,37 Si)                                                             | 300...600...900                                   | 86...54...32                                               |
| Ст. 20*4 (0,15 — 0,25 С; 0,35 — 0,65 Мн; 0,17 — 0,37 Si)                                                  | 300...600...800...900                             | 86...54...38...31                                          |
| Ст. 35*4 (0,32 — 0,4 С; 0,5 — 0,8 Мн; 0,17 — 0,37 Si)                                                     | 300...600...800                                   | 85...50...36                                               |

| Марка стали (массовый состав) *1                                                                            | T, K                         | $\lambda^{*2}$ , Вт/(м·к) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Ст. 45*4 (0,4 — 0,5 C; 0,5—0,8 Mn; 0,17—0,37 Si)                                                            | 300...600...800              | 79...43...30              |
| Ст. 65Г (0,62 — 0,7 C; 0,9—1,2 Mn; 0,17—0,37 Si)                                                            | 300...600...1000             | 45...28...24              |
| 15X (0,12 — 0,18 C; 0,4—0,7 Mn; 0,17—0,37 Si; 0,7 — 1 Cr)                                                   | 300...600...800...1200       | 39...35...33...30         |
| 15XΛ (0,12 — 0,17 C; 0,4 — 0,7 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,7 — 1 Cr)                                              |                              |                           |
| 20X (0,17 — 0,23 C; 0,5 — 0,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,7 — Cr)                                                 |                              |                           |
| 30X*4 (0,24 — 0,32 C; 0,5 — 0,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr)                                           | 300...600...900              | 48...38...28              |
| 35X*4 (0,31 — 0,39 C; 0,5 — 0,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr)                                           |                              |                           |
| 40Г*4 (0,37 — 0,45 C; 0,7 — 1 Mn; 0,17 — 0,37 Si)                                                           | 300...500...700              | 65...51...46              |
| 35Г2*4 (0,31—0,39 C; 1,4 — 1,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si)                                                          | 400...700                    | 38...36                   |
| 50Г2*4 (0,46 — 0,55 C; 1,4 — 1,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si)                                                        | 300...600...800              | 43...36...35              |
| 40XC*4 (0,37 — 0,45 C; 0,3 — 0,6 Mn; 1,2 — 1,6 Si; 1,3 — 1,6 Cr)                                            | 300...600...900              | 47...35...34              |
| 15XM (0,11 — 0,18 C; 0,4—0,7 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,4 — 0,55 Mo)                               | 300...600...800...1200       | 42...39...37...31         |
| 15XMA (0,26 — 0,33 C; 0,4 — 0,7 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,15—0,25 Mo)                             |                              |                           |
| 30XM (0,26 — 0,34 C; 0,4—0,7 Mn; 0,17—0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,15 — 0,25 Mo)                                | 300...600...800...1200       | 39...38...37...35         |
| 30XMA (0,26 — 0,33 C; 0,4 — 0,7 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,15 — 0,25 Mo)                           |                              |                           |
| 30XTC (0,28 — 0,35 C; 0,8 — 1,1 Mn; 0,9 — 1,2 Si; 0,8 — 1,1 Cr)                                             |                              |                           |
| 30XTCΛ (0,28 — 0,34 C; 0,8 — 1,1 Mn; 0,9 — 1,2 Si; 0,8 — 1,1 Cr)                                            |                              |                           |
| 15Л — 55Л*5 (0,15 — 0,55 C в зависимости от марки; 0,3 — 0,9 Mn; 0,2 — 0,4 Si; 0,45 — 0,6 S; 0,04 — 0,08 P) | 300...600...800...1200       | 46...41...38...33         |
| У8*6 (1,15 — 1,24 C; 0,15 — 0,35 Mn; 0,15 — 0,3 Si)                                                         | 300...1200                   | 50...26                   |
| У12 (1,15 — 1,24 C; 0,15 — 0,35 Mn; ≤0,2 Cr; 0,15 — 0,35 Si) [36, с. 197 — 198]                             | 300...600...900...1200       | 45...37...32...25         |
| П18 (0,7 — 0,8 C; 3,8 — 4,4 Cr; 17,5 — 18,5 W; 1 — 1,4 V; ≤ 1 Mo)                                           | 300...600...900...1200       | 22...26...26...24         |
| П12 (0,8 — 0,9 C; 3,1 — 3,6 Cr; 12 — 13 W; 1,5 — 1,9 V; ≤ 1 Mo) [37]                                        | 300...500...700              | 16...19...26              |
| 12X13*6 (0,09 — 0,15 C; 12 — 14 Cr; ≤ 0,8 Si; ≤ 0,8 Mn)                                                     | 200...300...600...900...1400 | 31...31...33...34...33    |

| Марка стали (массовый состав)*1                                                                  | T, К                          | $\lambda^{*2}$ , Вт/(м·К)                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
| 07X21Г7АН5*6 ( $\leq 0,07$ C; 6—7,5 Mn; 19,5—21 Cr; 5—6 Ni; 0,15—0,25 N) [24]                    | 10...20...40...80...300       | 1,7...3,5...5,9...10,2...17                |
| 15X12В2МФ*6 (0,1—0,17C; 0,5—0,8 Mn; 11—13 Cr; 1,7—2,2 W; 0,6—0,9 Mo; 0,15—0,3 V)                 | 200...300...900...1400        | 30...31...33...32                          |
| 18X12ВМБФР (0,15—0,22 C; 0,4—0,6 Mo; 0,5 Si; 11—13 Cr; 0,4—0,7W; 0,15—0,3V; 0,2—0,4 Nb)          | 200...300...600...900...1400  | 33...33...34...32...30                     |
| 12X18Н9Т*6 ( $\leq 0,12$ C; 1—2 Mn; 17—19 Cr; $\leq 0,8$ Si; 8—9,5 Ni; 5·C—0,8 Ti)               | 200...300...600...900...1400  | 13,5...14,5...19...23...28                 |
| 12X18Н10Т*6 ( $\leq 0,12$ C; $\leq 2$ Mn; $\leq 0,8$ Si; 17—19 Cr; 9—11 Ni; 5·C—0,8 Ti) [24, 38] | 10...20...40...80...150...300 | 1,5...3,7...5,5...8,2...<br>...11,0...15,1 |
| 12X18Н10Т*7 (состав тот же) [39]                                                                 | 300...600...900...1100        | 15,0...19,8...26,6...27,8                  |
| 20X23Н18 ( $\leq 0,1$ C; $\leq 2$ Mn; $\leq 1$ Si; 22—25 Cr; 17—20 Ni)                           | 200...300...600...1400        | 13,5...14...15...18                        |
| 08X16Н13М2В (0,06—0,12 C; 15—17 Cr; 12,5—14,5 Ni; 2—2,5Mo; 0,9—1,3 Nb)                           | 200...300...600...1000...1400 | 14...15...16...17...18                     |
| 08X18Н12В ( $\leq 0,08$ C; 0,8 Si; 1—2 Mn; 17—19 Cr; 11—13 Ni; 8 C—1,2 Nb)                       | 200...300...600...1000...1200 | 14...15...19...23...26                     |
| 10X18Н9ТЛ ( $\leq 0,14$ C; $\leq 1$ Si; 1—2 Mn; 17—20 Cr; 8—11 Ni; (C—0,03)·5—0,8 Ti)            | 200...300...600...1000...1400 | 13...14...18...25...28                     |
| ХН35ВТ ( $\leq 0,12$ C; 1—2 Mn; 14—16 Cr; 34—38 Ni; 2,8—3,5 W; 1,1—1,5 Ti)                       | 200...300...600...1000...1400 | 13...14...15...17...19                     |
| ХН35ВТР ( $\leq 0,1$ C; $\leq 1$ Mn; 14,4—16 Cr; 35—38 Ni; 2,8—3,5 W; 1,1—1,5 Ti)                |                               |                                            |
| Э11—Э13, Э1100—Э1300 [40]                                                                        | 300                           | 29                                         |
| Э41—Э43А [40]                                                                                    | 300                           | 12                                         |
| Э310—Э330 [40]                                                                                   | 300                           | 15                                         |
| Э45—Э46 [40]                                                                                     | 300                           | 13                                         |
| Чугун:                                                                                           |                               |                                            |
| серый средней прочности                                                                          | 300                           | 42—50                                      |
| легированный                                                                                     | 400                           | 29—58                                      |
|                                                                                                  | 700                           | 25—54                                      |

\*1 Цифры после букв в названии стали, как правило, указывают на округленное массовое содержание компонента в процентах (при содержании менее 1% цифру не пишут).

\*2 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

\*3 Массовый состав, %: 99,5 Fe; 0,03 C; 0,12 Si; 0,14 Mn; 0,025 S; 0,005 P; 0,20 Cu.

\*4 Сталь литая отожженная.

\*5 Сталь отожженная.

\*6 Сталь закаленная.

\*7 Эта сталь (ГОСТ 5632-72) рекомендована для образцовых мер теплопроводности (ГОСТ 8.140-82).

Таблица 15.8. Теплопроводности сплавов меди [22, 24]

| Сплав (массовый состав, %)                                        | T, К                         | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К)      |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Бронза:</b>                                                    |                              |                                |
| БрА5 (4—6 Al)                                                     | 300...600...900              | 105...130...150                |
| БрАЖМц10-3-1,5 (9—11 Al; 3—4 Fe; 1—2 Mn)                          | 300...600...800              | 59...77...84                   |
| БрБ2, отожженная в течение 2 ч при T = 573 К, мягкая (1,8—2,1 Be) | 4...10...20...40...80        | 2,3...5,0...11...21...37       |
| БрКд 1(0,9—1,2 Cd)                                                | 293                          | 340                            |
| БрКМц3-1 (1—1,5 Mn; 2,75—3,5 Si)                                  | 300...500...700              | 42...55...54                   |
| БрМц5 (4,5—5,5 Mn)                                                | 300...500...700              | 94...110...130                 |
| БрОФ10-1 (9—11 Sn; 0,4—1,1 P)                                     | 300...900                    | 34...52                        |
| БрОЦ4-3 (3,5—4 Sn; 2,7—3,3 Zn)                                    | 300...600...900              | 84...110...120                 |
| бериллиевая состаренная (3,0 Be; $\leq 0,1$ Fe)                   | 20...80...150...300          | 18...65...110...170            |
| фосфористая отожженная (18,07 Sn; 1,86 Zn; 0,16 Pb; 0,013 P)      | 20...80...150...300          | 6,0...20...77...190            |
| <b>Константан*2:</b>                                              |                              |                                |
| МНМц40-1,5 (39—41 Ni; 1—2 Mn)                                     | 273...473...573...673        | 21...26...31...37              |
| зарубежного производства (55 Cu; 45 Ni)                           | 4...10...20...40...80...300  | 0,8...3,5...8,8...13...18...23 |
| Копель МНМц43-0,5*2 (42,5—44 Ni; 0,1—0,5 Mn) [41]                 | 473...1273                   | 25...58                        |
| <b>Латунь:</b>                                                    |                              |                                |
| Л62 (Zn; 60,5—63,5 Cu)                                            | 300...600...900              | 110...150...200                |
| Л68 деформированная (Zn; 67—70 Cu)                                | 80...150...300               | 71...84...110                  |
| то же                                                             | 300...900                    | 110...120                      |
| Л80 полутомпак (Zn; 79—81 Cu)                                     | 300...600...900              | 110...120...140                |
| ЛАН59-3-2 (Zn; 57—60 Cu; 2,5—3,5 Al; 2—3 Ni)                      | 300...600...900              | 84...120...150                 |
| ЛМц58-2 (Zn; 57—60 Cu; 1—2 Mn)                                    | 300...600...900              | 70...100...120                 |
| Л070-1 (Zn; 69—71 Cu; 1—1,5 Sn)                                   | 300...600                    | 92...140                       |
| ЛС59-1 отожженная (Zn; 57—60 Cu; 0,8—1,9 Pb)                      | 4...10...20...40...80...300  | 3,4...10...19...34...54...120  |
| ЛС59-1В (Zn; 57—61 Cu; 0,8—1,9 Pb)                                | 300...600...900              | 110...140...180                |
| <b>Манганин:</b>                                                  |                              |                                |
| МНМц3-12 (2,5—3,5 Ni; 11,5—13,5 Mn)                               | 273...573                    | 22...36                        |
| зарубежного производства [42, с. 320]                             | 4...10...40...80...150...300 | 0,5...2...7...13...16...22     |
| Мельхиор МНЖМц30-0,8-1 (29—33 Ni; 0,5—1 Fe; 0,8—1,3 Mn)           | 300                          | 29—37                          |
| <b>Томпак:</b>                                                    |                              |                                |
| Л90 прокатный (Zn; 88—91 Cu)                                      | 300...900                    | 110...200                      |
| Л96 волооченный (Zn; 95—97 Cu)                                    | 300...800                    | 240...260                      |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

\*2 Сплав термоэлектродный.

Таблица 15.9. Теплопроводности сплавов никеля [22, 24, 40]

| Сплав (массовый состав, %)                                                  | T, К       | $\lambda^*1$ , Вт/(м·К) |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------|
| Алюмель НМЦАК2-2-1*2 (1,6—2,4 Al; 1,8—2,7 Mn; 0,85—1,5 Si; 0,6—1,2 Co) [41] | 293...1073 | 27...44                 |
| Инвар (35 Ni; 65 Fe)                                                        | 273...573  | 11...13                 |
| Монель НМЖМц28-2,5-1,5 (27—29 Cu; 2—3 Fe; 1,2—1,8 Mn)                       | 273...673  | 22...34                 |
| Нихром Х20Н80Т (20—23 Cr; 0,4—1,5 Si)                                       | 273...873  | 12...23                 |
| Ферронихром Х15Н60 (15—18 Cr; 20—25 Fe; 0,4—1,5 Si)                         | 273...673  | 12...18                 |
| Хромель НХ9,5*2 (9,0—10 Cr; 0,6—1,2 Co) [41]                                | 293...1073 | 18...34                 |
| НМц2,5 (2,3—3,3 Mn)                                                         | 293        | 53                      |
| МНц5 (4,6—5,4 Mn)                                                           | 293        | 48                      |
| 44НХТЮ (Fe; 0,4—0,8 Al; 5,2—5,8 Cr; 43,5—45,5 Ni; 2,2—2,7 Ti)               | 293        | 16                      |
| 41НХТА (Fe; 0,5—1,0 Al; 4,9—5,7 Cr; 41,5—43,5 Ni; 2,2—3,0 Ti)               | 293        | 16                      |
| 19НХ (Fe; 10—12 Cr; 0,3—0,6 Mn; 18—20 Ni; 0,2—0,4 Si)                       | 293        | 16                      |
| 65НП (Fe; 64,5—66 Ni)                                                       | 293        | 29                      |
| 79НМ (Fe; 76,5—80 Ni; 0,3—0,5 Si; 3,8—4,1 Mo; 0,6—1,1 Mn)                   | 293        | 13                      |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

\*2 Сплав термоэлектродный.

Таблица 15.10. Теплопроводности сплавов алюминия [24, 43]

| Сплав (массовый состав, %)                                                              | T, К                              | $\lambda^*1$ , Вт/(м·К)                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| АД1 нагартованный (примесь <0,7)                                                        | 4...10...20...40...80...150...300 | 50...130...260...400...250...220...210 |
| АВ (0,45—0,9 Mg; 0,5—1,2 Si; 0,1—0,5 Cu; 0,15—0,35 Mn)                                  | 300...573                         | 180...190                              |
| АД31 закаленный, искусственно состаренный (0,1 Fe; 0,65 Mg; 0,1 Mn; 0,38 Si)            | 4...10...20...40...80...200       | 35...87...170...270...230...200        |
| То же                                                                                   | 300—673                           | 190                                    |
| АД33 (0,8—1,2 Mg; 0,4—0,8 Si; 0,15—0,4 Cu; 0,15—0,35 Cr)                                | 300...573                         | 140...170                              |
| АК4 (1,9—2,5 Cu; 1,4—1,8 Mg; 1—1,5 Ni; 1,1—1,6 Fe; 0,5—1,2 Si) [22]                     | 300...500...600...700             | 145...160...170...170                  |
| АК8 закаленный, искусственно состаренный (3,9—4,8 Cu; 0,4—0,8 Mg; 0,4—1 Mn; 0,6—1,2 Si) | 20...40...80...150...300          | 50...72...100...125...160              |
| То же                                                                                   | 300...573...673                   | 160...180...180                        |
| АЛ1 (3,75—4,5 Cu; 1,75—2,25 Ni; 1,25—1,75 Mg) [22]                                      | 300...400...600                   | 130...140...150                        |
| АЛ4 (8—10,5 Si; 0,6—1,2 Fe; 0,25—0,5 Mn; 0,17—0,3 Mg)                                   | 300...473...673                   | 150...160...155                        |
| АЛ5 (4,5—5,5 Si; 1—1,5 Cu; 0,35—0,6 Mg)                                                 | 300...473...573                   | 160...170...180                        |
| АЛ8 (9,5—11,5 Mg)                                                                       | 300...473...673                   | 92...100...110                         |
| АМг2, отожженный в вакууме в течение 1 ч при T = 623 К (1,8—2,8 Mg; 0,2—0,6 Mn)         | 4...10...20...40...80...150...300 | 4,6...12...25...49...77...100...130    |
| АМг5 отожженный (4,8—5,8 Mg; 0,5—0,8 Mn; 0,02—0,1 Ti)                                   | 10...20...40...80...150...300     | 10...20...40...66...92...130           |
| То же                                                                                   | 300...473...673                   | 120...130...150                        |
| АМц нагартованный (1—1,6 Mn; 0,7 Fe; 0,6 Si; 0,2 Ti; 0,1 Zn; 0,05 Mg)                   | 4...10...20...40...80...150...300 | 11...28...58...110...140...150...170   |
| То же                                                                                   | 300...473...673                   | 180...180...190                        |
| В93 (6,3—7,3 Zn; 1,6—2,2 Mg; 0,8—1,2 Cu; 0,2—0,45 Fe)                                   | 300...473...673                   | 160...170...160                        |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

| Сплав (массовый состав, %)                                                               | T, К                          | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К)   |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| B95 (5—7 Zn; 1,8—2,8 Mg; 1,4—2 Cu; 0,2—0,6 Mn; 0,1—0,25 Cr)                              | 300...473...673               | 155...160...160             |
| ВАЛ1 (5,5—6,2 Cu; 0,8—1,2 Ni; 0,6—1 Mn; 0,15—0,3 Cr; 0,05—0,2 Zn)                        | 300...473...673               | 130...150...160             |
| ВАЛ5 (6,5—8,5 Si; 0,35—0,55 Mg; 0,1—0,3 Ti; 0,15—0,4 Be)                                 | 300...573...673               | 150...160...160             |
| ВАД1 отожженный (3,8—4,5 Cu; 2,3—2,7 Mg; 0,5—0,8 Mn; 0,08—0,15 Ti)                       | 20...80...300                 | 30...61...160               |
| ВД17 (2,6—3,2 Cu; 2—2,4 Mg; 0,45—0,7 Mn)                                                 | 300...673                     | 130...170                   |
| Д1 отожженный (3,8—4,8 Cu; 0,4—0,8 Mg; 0,4—0,88 Mn)                                      | 20...40...80...150...293      | 30...55...97...125...170    |
| Д16 закаленный, естественно состаренный (3,8—4,8 Cu; 1,2—1,8 Mg; 0,3—0,9 Mn)             | 10...20...40...80...150...300 | 9...19...37...61...90...120 |
| То же                                                                                    | 300...573                     | 120...160                   |
| Д20, закаленный, искусственно состаренный (6—7 Cu; 0,4—0,8 Mn; 0,25—0,45 Mg; 0,1—0,2 Ti) | 20...40...80...150...300      | 27...38...61...85...140     |
| То же                                                                                    | 300...673                     | 140...160                   |

Таблица 15.11. Теплопроводности сплавов титана [44]

| Сплав (массовый состав, %)                                                                                    | T, К                          | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К)    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| BT1 отожженный на воздухе в течение 40 мин при T = 873 К (0,014 C; 0,16 Fe; 0,045 Si; 0,028 N; 0,0092 H) [24] | 10...20...40...80...150...300 | 5,5...10...14...18...20...16 |
| BT5 (4,3—6,2 Al)                                                                                              | 300...673...973               | 8,8...12...17                |
| BT6C (5,3—6,8 Al; 3,5—5 V)                                                                                    | 300...673...973...1173        | 8,4...13...17...20           |
| BT8 (6—7,3 Al; 2,8—3,8 Mo; 0,2—0,4 Si) [22]                                                                   | 300                           | 7,1                          |
| BT14 (3,5—6,3 Al; 2,5—3,8 Mo; 0,9—1,9 V)                                                                      | 300...673...973...1173        | 8,4...13...17...20           |
| BT16 (1,8—3,8 Al; 4,5—5,5 Mo; 4—5,5 V)                                                                        | 300...673...973...1173        | 10...15...18...21            |
| BT3-1 (5,5—7 Al; 2—3 Mo; 0,8—2,3 Cr; 0,15—0,4 Si) [22]                                                        | 300                           | 7,9                          |
| OT4 (3,5—5 Al; 0,8—2 Mn)                                                                                      | 300...673...873               | 9,6...13...16                |
| OT41 (1—2,5 Al; 0,7—2 Mn)                                                                                     |                               |                              |
| OT40 (0,2—1,4 Al; 0,2—1,3 Mn)                                                                                 |                               |                              |
| OT42 (5,7—6,7 Al; 1—2,3 Mn)                                                                                   | 300...673...973...1173        | 13...15...18...20            |
|                                                                                                               | 300...673...973...1173        | 7,1...13...18...21           |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.12. Теплопроводности сплавов магния [24, 45]

| Сплав (массовый состав, %)                         | T, К            | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К) |
|----------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| МА1 (1,3—2,5 Mn)                                   | 300...473...673 | 126...138...134           |
| МА2 (3—4 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)              | 300...473...673 | 96...105...113            |
| МА2-1*2 (3,8—5 Al; 0,4—0,8 Mn; 0,8—1,5 Zn; 0,1 Ca) | 20...80...300   | 13...26...96              |
| МА5 (7,8—9,2 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)          | 300             | 59                        |
| МА8*3 (1,5—2,5 Mn; 0,15—4,35 Ca)                   | 300             | 130                       |
| МА11 (1,5—2,5 Mn; 2,5—3,5 Nd)                      | 300...473...673 | 110...117...117           |
| МА15 (2,5—3,5 Zn; 0,45—0,9 Zr) [46]                | 300             | 110                       |
| ВМ65-1 (5—6 Zn; 0,3—0,9 Zr)                        | 300...473...673 | 117...126...126           |
| ВМД1 (1,2—2 Mn; 2,5—3,5 Th)                        | 300             | 130                       |
| ВМС1 (3—4 Al; 1,2—2 Zn; 0,4—0,9 Zr)                | 293             | 96                        |
| МЛ2*4 (1—2 Mn)                                     | 293             | 130                       |



| Сплав (массовый состав, %)                              | T, К | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К) |
|---------------------------------------------------------|------|---------------------------|
| МЛЗ <sup>*4</sup> (2,5—3,5 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,5—1,5 Zn) | 293  | 105                       |
| МЛ4 <sup>*5</sup> (5—7 Al; 0,15—0,5 Mn; 2—3 Zn)         | 293  | 80                        |
| МЛ5 <sup>*5</sup> (7,5—9 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)   | 293  | 77                        |
| МЛ6 <sup>*6</sup> (9—10,2 Al; 0,1—0,5 Mn; 0,6—1,2 Zn)   | 293  | 77                        |
| МЛ8 (5,5—6,6 Zn; 0,7—1,1 Zr; 0,2—0,8 Cd) [46]           | 293  | 120                       |
| МЛ10 <sup>*6</sup> (0,1—0,7 Zn; 0,4—1 Zr; 2,2—2,8 Nd)   | 293  | 110                       |
| МЛ12 <sup>*7</sup> (4—5 Zn; 0,6—1,1 Zr)                 | 293  | 130                       |
| МЛ14 <sup>*7</sup> (1,7—2,3 Al; 0,5—1 Zr; 2,6—3,8 Th)   | 293  | 110                       |
| МЛ15 <sup>*7</sup> (4—5 Zn; 0,7—1 Zr; 0,6—1,2 La)       | 293  | 140                       |
| ВМЛ1 <sup>*6</sup> (0,5—1 Zr; 2,5—4 Th)                 | 293  | 110                       |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

\*2 Отожженный в течение 30 мин при T = 533 К.

\*3 То же при T = 623 К.

\*4 Литой.

\*5 Закаленный.

\*6 Закаленный и состаренный.

\*7 Состаренный.

Таблица 15.13. Теплопроводности жаростойких и жаропрочных сплавов и сплавов на основе тугоплавких металлов [7, 22]

| Сплав (массовый состав, %)                                                                            | T, К                      | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ХН60В (Ni; $\leq 0,1$ C; 23,5—26,5 Cr; 0,3—0,5 Ti; $\leq 0,5$ Al; 13—16 W; 4 Fe)                      | 200...300...600...1000    | 9,0...9,8...14...23       |
| ХН60Ю ( $\leq 0,1$ C; 15—18 Cr; 2,6—3,5 Al; $\leq 0,3$ Mn; $\leq 0,8$ Si; 55—58 Ni)                   | 200...300...800...1400    | 8,0...9,6...19...29       |
| ХН70ВМЮТ (Ni; $\leq 0,12$ C; 13—16 Cr; 2—4 Mo; 0,1—0,5 V; 5—7 W; 1,8—2,3 Ti; $\leq 5$ Fe; 1,7—2,3 Al) | 200...300...800...1400    | 7...8...18...24           |
| ХН70ВМТЮ (Ni; 0,1—0,16 C; 14—16 Cr; 1—1,4 Ti; 1,7—2,2 Al; 4—6 W; 3—5 Mo)                              | 200...300...600...1000    | 11...12...16...24         |
| ХН77ТЮ, ХН77ТЮР (Ni; 19—22 Cr; 2,4—2,8 Ti; 0,6—1 Al)                                                  | 300...900                 | 13...23                   |
| ХН78Т (Ni; 0,12 C; 19—22 Cr; 0,15—0,35 Ti; 0,15 Al; 1 Fe)                                             | 200...300...800...1400    | 11...12...21...27         |
| ХН80ТБЮ (Ti; $\leq 0,08$ C; $\leq 1$ Mn; 15—18 Cr; $\leq 3$ Fe; 1—1,5 Nb; 1,8—2,3 Ti; 0,5—1 Al)       | 573...773...973...1173    | 90...86...86...92         |
| МВ50 (W; 47,5—50 Cu)                                                                                  | 523...773...973...1173    | 50...54...63...75         |
| ВР20 <sup>*2</sup> (W; (20 $\pm$ 0,5) Re)                                                             | 373...773...1473...2173   | 130...120...110...90      |
| ВМ1 (Mo; 0,01 C; 0,08—0,25 Zr; 0,4 Ti)                                                                | 673...973                 | 120...100                 |
| ВМ2 (Mo; 0,02 C; 0,25—0,4 Zr; 0,2 Ti)                                                                 | 4...6...10...20...40...80 | 0,038...0,13...0,65...    |
| ВМ3 (Mo; 0,25—0,5 C; 0,3—0,6 Zr; 0,8—1,3 Ti; 1—1,8 Nb)                                                |                           | ...2,6...2,8...2,4        |
| ЦМВ30 (Mo; 0,01 C; 30 W)                                                                              |                           |                           |
| Nb <sub>3</sub> Sn, сверхпроводник-((70,5 $\pm$ 0,05) Nb), T <sub>c</sub> = 18,3 К [47]               |                           |                           |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

\*2 Сплав термоэлектродный.

Таблица 15.14. Теплопроводности сплавов на основе благородных металлов [24]

| Сплав (массовый состав, %)          | T, К | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К) |
|-------------------------------------|------|---------------------------|
| Ag — Cu (92,5 Ag; 7,5 Cu)           | 300  | 350                       |
| (90 Ag; 10 Cu)                      | 300  | 345                       |
| (80 Ag; 20 Cu)                      | 300  | 340                       |
| (50 Ag; 50 Cu)                      | 300  | 310                       |
| Ag — Pd (95 Ag; 5 Pd) <sup>*2</sup> | 300  | 220                       |
| (90 Ag; 10 Pd) <sup>*2</sup>        | 300  | 140                       |
| (80 Ag; 20 Pd) <sup>*2</sup>        | 300  | 92                        |
| (50 Ag; 50 Pd) <sup>*2</sup>        | 300  | 35                        |

Продолжение табл. 15.14

| Сплав (массовый состав, %)                                                 | T, К                      | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К)    |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Ag — Au зарубежного производства (99,63 Ag; 0,37 Au) <sup>*3, *4</sup> [7] | 20...40...<br>...80...100 | 290...330...<br>...350...360 |
| (90 Ag; 10 Au)                                                             | 300                       | 200                          |
| (30 Ag; 70 Au)                                                             | 300                       | 290                          |
| Pt — Rh (90 Pt; 10 Rh) <sup>*3</sup> [36]                                  | 300—400                   | 30                           |
| Pt — Ir (90 Pt; 10 Ir) <sup>*5</sup>                                       | 300                       | 30                           |

| Сплав (массовый состав, %)                                                                                      | T, К                                      | $\lambda^{\ast 1}$ , Вт/(м · К)                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| (80Pt; 20Ir)* <sup>5</sup>                                                                                      | 300                                       | 18                                             |
| (70Pt; 30Ir)* <sup>5</sup>                                                                                      | 300                                       | 16                                             |
| Au—Fe зарубежного производства, отожженный, $\rho(300\text{ K})/\rho_0 = 9,0$ (Au; 0,03 Fe)* <sup>3,4</sup> [7] | 4...10...<br>...20...40...<br>...80...300 | 50...130...<br>...210...240...<br>...250...310 |
| Au—Co зарубежного производства, холодно-тянутый (Au; 2,1 Co)* <sup>3,4</sup> [7]                                | 4...10...<br>...20...40...<br>...80...100 | 1,0...4,2...<br>...8,5...14...<br>...20...24   |

\*<sup>1</sup> Теплопроводности соответствуют указанным температурам.\*<sup>2</sup> Механически обработан в холодном состоянии.\*<sup>3</sup> Сплав термоэлектродный.\*<sup>4</sup> Атомный состав, %.\*<sup>5</sup> Штампован в холодном состоянии.

Таблица 15.15. Теплопроводности сплавов на основе радиоактивных металлов [22]

| Сплав (массовый состав, %)                                         | T, К                          | $\lambda^{\ast 1}$ , Вт/(м · К) |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| U—Al (99 U; 1 Al)                                                  | 200...300...900               | 14...14...<br>...13,6           |
| (90 U; 10 Al)                                                      | 200...300...900               | 10...10...<br>...9,8            |
| (70 U; 30 Al)                                                      | 200...300...800               | 31...30...28                    |
| (50 U; 50 Al)                                                      | 200...300...<br>...500...700  | 68...66...<br>...54...34        |
| (10 U; 90 Al)                                                      | 300                           | 190                             |
| UAl <sub>3</sub> , $\gamma = 6,8$ г/см <sup>3</sup>                | 300                           | 26                              |
| U <sub>3</sub> Si, $\gamma = 15,6$ г/см <sup>3</sup>               | 300                           | 20                              |
| U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> , $\gamma = 12,2$ г/см <sup>3</sup> | 300                           | 14                              |
| U—Cr (95U; 5Cr)                                                    | 300                           | 21                              |
| (90 U; 10 Cr)                                                      | 300                           | 17                              |
| (70 U; 30 Cr)                                                      | 300                           | 10                              |
| (50 U; 50 Cr)                                                      | 300                           | 8,5                             |
| (30 U; 70 Cr)                                                      | 300                           | 16                              |
| U—Fe (95 U; 5Fe)                                                   | 300                           | 24                              |
| (90 U; 10Fe)                                                       | 300                           | 22                              |
| (70 U; 30Fe)                                                       | 300                           | 17                              |
| (50 U; 50 Fe)                                                      | 300                           | 20                              |
| (30 U; 70 Fe)                                                      | 300                           | 33                              |
| U—Zr (95 U; 5 Zr)                                                  | 300                           | 19                              |
| (90 U; 10 Zr)                                                      | 300                           | 14                              |
| (70 U; 30 Zr)                                                      | 300                           | 6                               |
| (50 U; 50 Zr)                                                      | 300                           | 5                               |
| (30 U; 70 Zr)                                                      | 300                           | 6                               |
| U—Mo (95 U; 5 Mo)                                                  | 300                           | 25                              |
| (90 U; 10 Mo)                                                      | 300                           | 23                              |
| (70 U; 30 Mo)                                                      | 300                           | 27                              |
| (50 U; 50 Mo)                                                      | 300                           | 40                              |
| (10 U; 90 Mo)                                                      | 300                           | 110                             |
| UBi                                                                | 300                           | 21                              |
| U <sub>3</sub> Bi <sub>4</sub>                                     | 300                           | 19                              |
| UBi <sub>2</sub>                                                   | 300                           | 17                              |
| (65 U + 20 Pu + 5 Mo + 10 продуктов деления)                       | 479...808...868               | 15...23...22                    |
| (70 U + 20 Pu + 10 продуктов деления)                              | 323...573...<br>...873...1073 | 9,6...16...<br>...24...30       |

| Сплав (массовый состав, %) | T, К            | $\lambda^{\ast 1}$ , Вт/(м · К) |
|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Th—U (90 Th; 10 U)         | 323...1073      | 36...44                         |
| (80 Th; 20 U)              | 323...1073      | 35...43                         |
| (Zr + 8 U)                 | 373...723       | 14...17                         |
| (Zr + 8 U + 1 H)           | 373...473...673 | 20...18...17                    |

Таблица 15.16. Теплопроводности припоев и подшипниковых материалов [46]

| Сплав (массовый состав, %) | T, К | $\lambda^{\ast 1}$ , Вт/(м · К) |
|----------------------------|------|---------------------------------|
|----------------------------|------|---------------------------------|

## Алюминиевые антифрикционные сплавы

|                                              |     |     |
|----------------------------------------------|-----|-----|
| АН2,5 (Al; 2,7—3,3 Ni)                       | 300 | 130 |
| АО6-1 (Al; 5,5—7 Sn; 0,7—1,3 Cu; 0,7—1,3 Ni) | 300 | 180 |

## Баббиты

|                                                            |     |    |
|------------------------------------------------------------|-----|----|
| БКА (Pb; 0,95—1,15 Ca; 0,7—0,9 Na; 0,05—0,2 Al)            | 300 | 21 |
| Б16 (Pb; 15—17 Sn; 15—17 Sb; 1,5—2 Cu)                     | 300 | 25 |
| Б83 (Sn; 10—12 Sb; 5,5—6,5 Cu)                             | 300 | 33 |
| Б88 (Sn; 7,3—7,8 Sb; 2,5—3,5 Cu; 0,8—1,2 Cd; 0,15—0,25 Ni) | 300 | 39 |

## Припои

|                                                                           |                                           |                                            |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| ПОС61 (Pb; 60—62 Sn)                                                      | 300                                       | 50                                         |
| ПОС18 (Pb; 18Sn; 2,5Sb) [22]                                              | 300                                       | 38                                         |
| ПОССу18-2 (Pb; 17—18 Sn; 1,5—2,0 Sb)                                      | 300                                       | 34                                         |
| ПОССу40-2 (Pb; 39—41 Sn; 1,5—2,0 Sb)                                      | 300                                       | 42                                         |
| (60 Sn; 40 Pb) [24]                                                       | 4...10...<br>...40...80...<br>...300      | 18...40...<br>...51...49...<br>...50       |
| Сплав Вуда (50Bi; 25Pb; 12,5Cd; 12,5Sn) [24]                              | 4...10...<br>...20...40...<br>...80...100 | 4,0...11...<br>...18...20...<br>...23...24 |
| Сплав Розе (56,1Bi; 28Pb; 15,9Sn) [24]                                    | 10...20...<br>...80...<br>...150...273    | 3,4...5...<br>...8,4...<br>...11...16      |
| ПСр25 (Zn; (25±0,3) Ag; (40±1) Cu)                                        | 300                                       | 105                                        |
| ПСр44 ((44±1) Ag; (27±1) Cu; (16±2) Zn; (8±1) Cd; (2±0,5) Ni) (3±0,5) Mn) | 300                                       | 38                                         |
| ПСр70 (Zn; (70±0,5) Ag; (26±0,5) Cu)                                      | 300                                       | 170                                        |

\*<sup>1</sup> Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.17. Теплопроводности полупроводников, Вт/(м·К) [7, 25]

| Полупроводник                                                                                    | T, К |      |           |             |      |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-----------|-------------|------|-------------|
|                                                                                                  | 10   | 20   | 40        | 80          | 150  | 300         |
| Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> нелегированный, $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$            | —    | —    | —         | —           | 2,7  | 2,8         |
| CdSb $p$ -типа, $n = (3 \div 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,<br>   [001]                     | —    | —    | —         | 4,9 (100 К) | 3,0  | 1,9         |
| ZnSb, чистота исходного материала 99,9999%                                                       | 260  | 210  | 40        | 11,5        | 5,2  | 5,0         |
| ZnO*1, концентрация примесей $\leq 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [48]                       | 300  | 520  | 450       | 260         | 134  | 54          |
| ZnS, гексагональная структура, концентрация примесей $\leq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [48] | 300  | 380  | 310       | 155         | 70   | 27          |
| CdS, концентрация примесей $\geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,<br>   оси $c$                        | 540  | 360  | 200       | 97          | 43   | 20          |
| CdSe $n$ -типа, чистота исходного материала $> 99,99\%$ , нелегированный,    оси $c$             | 230  | 200  | 72        | 32          | —    | —           |
| CdTe, концентрация примесей $\leq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [48]                          | 520  | 250  | 117       | 44          | 18,4 | 7,5         |
| HgSe $n$ -типа, $n(4,2 \text{ К}) = 2,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [49]                      | 120  | 93   | 41        | 11          | 4,4  | 1,7         |
| HgTe $p$ -типа, концентрация акцепторов $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$                      | —    | —    | 25 (60 К) | 14          | 5,0  | 2,6         |
| BN*2 [50]                                                                                        | —    | 2,0  | 10        | 43          | 112  | 180         |
| AlN*3 [50]                                                                                       | 65   | 100  | 175       | 290         | 330  | 200         |
| AlSb $p$ -типа, $R(300 \text{ К}) = 7,0 \text{ см}^2/\text{Кл}$                                  | 72   | 280  | 330       | 210         | 115  | 69 (250 К)  |
| GaP $p$ -типа, $R(300 \text{ К}) = 75 \text{ см}^2/\text{Кл}$                                    | 190  | 590  | 700       | 450         | 210  | 140 (250 К) |
| GaAs $n$ -типа, $n(77 \text{ К}) = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$                              | 1400 | 2500 | 780       | 270         | 105  | 58          |
| GaSb $p$ -типа, $n = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$                                          | 140  | 340  | 320       | 180         | 85   | 36          |
| InP $n$ -типа, $n(77 \text{ К}) = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$                               | 1800 | 2700 | 1200      | 470         | 190  | 70          |
| InAs $n$ -типа, $n(77 \text{ К}) = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$                              | 2900 | 1700 | 600       | 170         | —    | —           |
| InSb $n$ -типа, $n = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$                                            | 2000 | 1100 | 370       | 90          | 42   | —           |
| SiC $n$ -типа, концентрация атомов N $10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,    оси $c$                      | 350  | 1900 | 5100      | 4100        | 1500 | 490         |
| PbS $p$ -типа, $n(300 \text{ К}) = 1,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$                            | 70   | 48   | 13        | 8,0         | —    | —           |
| PbS природный, $n(300 \text{ К}) = 1,48 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$                           | —    | —    | —         | 5,5 (100 К) | 3,9  | 2,6         |
| PbSe $p$ -типа, $n(300 \text{ К}) = 5,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$                           | 70   | 37   | 11,5      | 5,2         | —    | —           |
| PbSe $n$ -типа, $n = 6,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , легированный Cu                        | —    | —    | —         | 5,0         | 3,0  | 1,8         |
| Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> $n$ -типа, $n(77 \text{ К}) = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$   | —    | —    | —         | 6,4         | 3,5  | 2,9         |

\*1 Приведены средние значения теплопроводности ZnO гексагональной структуры:  $\lambda_{\text{ср}} = 1/3 (2\lambda_a + \lambda_c)$ , где  $\lambda_a$  и  $\lambda_c$  — теплопроводности вдоль осей  $a$  и  $c$  соответственно; для  $30 < T < 300 \text{ К}$   $\lambda_a/\lambda_c = 1,2$ .

\*2 Горячепрессованная поликристаллическая керамика плотностью 97% теоретической, размер зерен 20 мкм, концентрация примесей  $O$  и  $S$  меньше  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

\*3 Синтетический монокристалл, атомное содержание кислорода  $(1 \div 5) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .  
Обозначения:  $n$  — концентрация носителей тока;  $R$  — постоянная Холла.

Таблица 15.18. Теплопроводности некоторых диэлектрических монокристаллов, Вт/(м·К) [7, 25]

| Кристалл (атомное содержание, %)  | T, К      |        |        |        |      |      |      |
|-----------------------------------|-----------|--------|--------|--------|------|------|------|
|                                   | 4         | 10     | 20     | 40     | 80   | 150  | 300  |
| BeO [50, 51]                      | 47        | 750    | 5100   | 13 500 | 6700 | 1360 | 370  |
| MgO                               | 270 (6 К) | 1100   | 3000   | 2200   | 460  | 135  | 58   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *1 | 240       | 3000   | 12 500 | 13 500 | 1100 | 125  | 40   |
| Сапфир*2,    оси $c$              | 125       | 2300   | 10 000 | 11 500 | 1100 | 155  | 47   |
| SiO <sub>2</sub> *3,    оси $c$   | 470       | 2700   | 530    | 150    | 60   | 27,3 | 14,3 |
| TiO <sub>2</sub>                  | 180       | 1750   | 600    | 65     | 18   | —    | —    |
| NiO <sub>2</sub>                  | 5         | 60     | 220    | 430    | 280  | 120  | 38   |
| UO <sub>2</sub> *4                | 8,6       | 9,6    | 1,65   | 1,4    | 4,2  | 7,7  | 8,4  |
| LiF:                              |           |        |        |        |      |      |      |
| (0,02% Li)                        | 510       | 6000   | 10 000 | 1380   | —    | —    | —    |
| (7,4% Li)*5                       | 440       | 2700   | 2800   | 930    | 127  | —    | —    |
| (50,1% Li)                        | 370       | 1900   | 1800   | 700    | 115  | 37   | —    |
| NaF*6,    [100], [52]             | 750       | 10 000 | 14 000 | 620    | 130  | —    | —    |

| Кристалл (атомное содержание, %)                             | T, К |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                              | 4    | 10   | 20   | 40   | 80   | 150  | 300  |
| CaF <sub>2</sub> ,    [100]                                  | 700  | 2600 | 2800 | 570  | 60   | 22   | 12,5 |
| MnF <sub>2</sub> *7,    оси a                                | 67   | 430  | 450  | 135  | 40   | 16   | 7,7  |
| CoF <sub>2</sub> *8                                          | 4,2  | !    | 27   | 19,5 | 25   | 15,5 | —    |
| NaCl                                                         | 530  | 900  | 300  | 80   | 34   | 15,5 | 7,4  |
| KCl                                                          | 630  | 510  | 225  | 70   | 20   | —    | —    |
| RbCl                                                         | 310  | 190  | 85   | 30   | 11   | —    | —    |
| NaBr                                                         | 95   | 160  | 70   | 27   | 13   | —    | —    |
| KBr                                                          | 480  | 250  | 90   | 34   | 15,5 | —    | 4,8  |
| KI                                                           | 700  | 360  | 130  | 39   | 12   | —    | 5,02 |
| SrTiO <sub>3</sub> *9,    (100)                              | 1,5  | 8,5  | 20   | 19   | 18   | 16   | 12   |
| Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> *10,    [100] | 13,5 | 125  | 220  | 112  | 37   | 15   | 7,4  |

\*1 Размеры образца: диаметр 5 мм, длина 50 мм.

\*2 Концентрация примесей Cr, Fe, Mg, Si меньше 10<sup>-3</sup> см<sup>-3</sup>.

\*3 Размеры образца 5×5×40 мм.

\*4 Антиферромагнетик при T &lt; 30 К.

\*5 Нормальный изотопический состав.

\*6 Атомное содержание примесей меньше 1·10<sup>-6</sup> см<sup>-3</sup>, сечение образца 5,1×5,1 мм.

\*7 Антиферромагнетик при T &lt; 67 К.

\*8 Антиферромагнетик при T &lt; 38 К, ось образца составляет угол 26° с осью c.

\*9 Параэлектрик, температуры переходов 35, 65 и 110 К.

\*10 Ферромагнетик при T &lt; 560 К, средний диаметр образца 3,9 мм, длина 11,3 мм.

Таблица 15.19. Теплопроводности стекол [24, 53]

| Материал*1<br>(массовый состав, %)                                                                                                                             | T, К                                          | λ*2, Вт/(м·К)                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Кварцевое стекло (плавленный кварц)                                                                                                                            | 4...10...20...40...80...100                   | 0,13...0,135...0,16...0,25...<br>...0,52...0,70       |
| То же [54]                                                                                                                                                     | 60...80...160...300...500...<br>...800...1100 | 0,41...0,52...0,96...1,36...<br>...1,63...1,81...1,98 |
| То же, КВ [38]                                                                                                                                                 | 60...70...80...90                             | 0,45...0,52...0,58...0,64                             |
| Крон:                                                                                                                                                          |                                               |                                                       |
| легкий ЛК5                                                                                                                                                     | 90...150...300                                | 0,52...0,87...1,2                                     |
| баритовый серии 100БК1 10                                                                                                                                      | 293                                           | 0,75                                                  |
| Стекло:                                                                                                                                                        |                                               |                                                       |
| боросиликатное С38-1 (ЗС-9)                                                                                                                                    | 300                                           | 0,92                                                  |
| боросиликатное С39-1 (№ 17)                                                                                                                                    | 300                                           | 1,3                                                   |
| боросиликатное С47-1 (№ 46)                                                                                                                                    | 300                                           | 0,84                                                  |
| боросиликатное (пирекс) (80 SiO <sub>2</sub> ; 13 В <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 4 (Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O)) | 20...80...150...300                           | 0,142...0,54...0,84...1,34                            |
| известково-натриевое                                                                                                                                           | 20...80...150...300                           | 0,142...0,46...0,70...1,05                            |
| свинцовое тугоплавкое (40—50 PbO)                                                                                                                              | 20...80...150...300                           | 0,142...0,36...0,51...0,71                            |
| Фарфор [55]                                                                                                                                                    | 80...150...300...500...700...<br>...1140      | 0,96...1,35...1,68...1,72...<br>...1,81...2,25        |
| Фаянс разных сортов                                                                                                                                            | 300                                           | 0,93—1,3                                              |
| Флинт:                                                                                                                                                         |                                               |                                                       |
| тяжелый ТФ1                                                                                                                                                    | 90...150...300                                | 0,34...0,52...0,70                                    |
| баритовый БФ8                                                                                                                                                  | 293                                           | 0,81                                                  |
| Хрусталь, γ = 2,6 ÷ 2,85 г/см <sup>3</sup> [15]                                                                                                                | 293                                           | 0,88—0,91                                             |

\*1 Образцы отожженные.

\*2 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.20. Теплопроводности плотных (пористость  $P = 0\%$ ) спеченных оксидов [22]\*1

| Оксид                          | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $T$ , К                                      | $\lambda^{*2}$ , Вт/(м·К)      |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,7—3,8                      | 400...700...<br>...1100...1500...<br>...2000 | 30...13...7...<br>...5...7     |
| BeO [51]                       | 3,01                         | 400...700...<br>...1000...1500...<br>...2000 | 230...89...<br>...48...22...15 |
| CaO                            | 3,0—3,1                      | 400...700...<br>...1500...2200               | 15...9...6...8                 |
| SiO <sub>2</sub>               | 2,3—2,6                      | 400...700...<br>...1300...1500               | 13...9...6...7                 |
| MgO                            | 3,3—3,5                      | 400...700...<br>...1100...1700...<br>...2000 | 36...16...8...<br>...6...9     |
| NiO                            | 5,0—5,1                      | 400...700...<br>...1700                      | 13...6...5                     |
| TiO <sub>2</sub>               | 4,0—4,1                      | 400...700...<br>...1500                      | 8...5...3                      |
| ZrO <sub>2</sub>               | 5,2—5,3                      | 400...900...<br>...1500...2000               | 1,7...1,8...<br>...2,0...2,0   |

\*1 Экспериментальные данные о теплопроводности оксидов см. также в [56].

\*2 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.21. Теплопроводности пресованных и спеченных карбидов [22, 57]

| Карбид                          | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $T$ , К                                            | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К)                 |
|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| B <sub>4</sub> C                | 2,32—2,5                     | 300...1100                                         | 28...13                                   |
| B <sub>2</sub> C (в Ar)         | 2,2                          | 300...900                                          | 32...18                                   |
| Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>  | 6,68                         | 293                                                | 13                                        |
| Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> | 6,97                         | 293                                                | 18                                        |
| HiC                             | 11,8—12,6                    | 573...1473                                         | 9...17                                    |
| Mo <sub>5</sub> C               | 9,18                         | 293                                                | 7                                         |
| NbC                             | 7,82                         | 400...1200...<br>...2500                           | 14...44...44                              |
| Nb <sub>2</sub> C               | 7,85                         | 400                                                | 19                                        |
| SiC                             | 3,2                          | 200...300...<br>...600...1000...<br>...1800...2500 | 36...31...<br>...23...16...<br>...12...14 |
| TaC                             | 14,5                         | 573...1673...<br>...2673                           | 34...40...38                              |
| Ta <sub>2</sub> C               | 15,5                         | 293                                                | 36                                        |
| TiC                             | 4,72—4,92                    | 523...973                                          | 33...11                                   |
| VC                              | 5,48                         | 293                                                | 25                                        |
| WC                              | 15,65                        | 293                                                | 29                                        |
| W <sub>2</sub> C                | 17,3                         | 293                                                | 36                                        |
| ZrC                             | 6,7                          | 573...1673...<br>...2673                           | 53...35...38                              |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.22. Теплопроводности пресованных и спеченных боридов, нитридов и силицидов при комнатной температуре [22]

| Соединение                     | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $\lambda$ , Вт/(м·К) | Соединение        | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $\lambda$ , Вт/(м·К) |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| BaB <sub>6</sub>               | —                            | 36                   | Mo <sub>3</sub> N | 9,9                          | 50                   |
| CaB <sub>6</sub>               | —                            | 23                   | NbN               | 8,4                          | 10                   |
| CrB <sub>2</sub>               | 5,6                          | 22                   | TaN               | 13,8                         | 23                   |
| Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub> | 8,0                          | 27                   | TiN               | 5,21                         | 29                   |
| NbB <sub>2</sub>               | 6,0                          | 17                   | VN                | 6,04                         | 31                   |
| SrB <sub>6</sub>               | —                            | 26                   | ZrN               | 7,35                         | 14                   |

Продолжение табл. 15.22

| Соединение                    | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $\lambda$ , Вт/(м·К) | Соединение        | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $\lambda$ , Вт/(м·К) |
|-------------------------------|------------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|
| TaB <sub>2</sub>              | 11,7                         | 11                   | CrSi <sub>2</sub> | 4,4                          | 6                    |
| TiB <sub>2</sub>              | 4,5                          | 24                   | MoSi <sub>2</sub> | 6,3                          | 29                   |
| W <sub>3</sub> B <sub>5</sub> | 11,0                         | 32                   | NbSi <sub>2</sub> | 5,45                         | 26                   |
| ZrB <sub>2</sub>              | 6,1                          | 23                   | TaSi <sub>2</sub> | 8,83                         | 12                   |
| CrN                           | 5,9                          | 32                   | TiSi <sub>2</sub> | 4,35                         | 13                   |
| Cr <sub>3</sub> N             | 6,5                          | 60                   | WSi <sub>2</sub>  | 9,33                         | 19                   |
| MoN                           | 8,6                          | 16                   | ZrSi <sub>2</sub> | 4,88                         | 18                   |

Таблица 15.23. Теплопроводности плотных обожженных огнеупоров при атмосферном давлении [58]

| Изделие (массовый состав, %)                                                      | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> ,<br>при $t = 20^\circ\text{C}$ | $H^{*1}$ , % | $\lambda$ , Вт/(м·К), при $t$ , °C |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------|------|------|------|------|
|                                                                                   |                                                              |              | 200                                | 400  | 800  | 1200 | 1600 |
| Из кварцевого стекла ( $\geq 97$ SiO <sub>2</sub> )                               | 2,2—2,09                                                     | 0—3          | 1,4                                | 1,9  | 3,0  | 4,5  | —    |
| Линсовые ( $\geq 93$ SiO <sub>2</sub> )                                           | 1,67—1,50                                                    | 24—30        | 0,42                               | 0,34 | 0,46 | 0,94 | 1,8  |
| Линсовые с добавками ( $80 \leq \text{SiO}_2 \leq 93$ )                           | 2,10—1,93                                                    | 10—16        | 1,6                                | 1,7  | 1,9  | 2,3  | 3,0  |
| Полукислые ( $< 28$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; $\leq 85$ SiO <sub>2</sub> ) | 2,14—1,99                                                    | 16—20        | 1,25                               | 1,4  | 1,8  | 2,1  | —    |
| Шамотные ( $28 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45$ )                              | 1,95—1,80                                                    | 24—30        | 0,85                               | 0,92 | 1,1  | 1,2  | —    |
| Муллитокремнеземистые ( $45 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 62$ )                       | 2,16—1,92                                                    | 16—20        | 0,88                               | 0,94 | 1,1  | 1,2  | 1,1  |
| Муллитовые ( $62 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 72$ )                                  | 2,45—2,26                                                    | 16—20        | 1,4                                | 1,4  | 1,4  | 1,4  | 1,4  |
|                                                                                   | 3,00—2,85                                                    | 0—3          | 5,6                                | 4,9  | 4,1  | 3,8  | 3,9  |
|                                                                                   | 2,52—2,34                                                    | 20—24        | 1,2                                | 1,3  | 1,5  | 1,7  | 1,8  |

| Изделие (массовый состав, %)                                                    | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> ,<br>при $t = 20^\circ\text{C}$ | $P^{*1}$ , % | $\lambda$ , Вт/(м·К), при $t_\lambda$ , °C |      |     |      |        |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|------|-----|------|--------|
|                                                                                 |                                                              |              | 200                                        | 400  | 800 | 1200 | 1600   |
| Мулитокорундовые ( $72 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 90$ )                          | 2,89—2,68                                                    | 16—20        | 2,7                                        | 2,6  | 2,4 | 2,3  | 2,3    |
| Корундовые (глиноземистые) ( $>90 \text{ Al}_2\text{O}_3$ )                     | 3,9—3,7                                                      | 0—3          | 20                                         | 12,8 | 6,7 | 5,2  | 6,2    |
|                                                                                 | 3,12—2,89                                                    | 20—24        | 4,1                                        | 3,5  | 2,7 | 2,4  | 2,5    |
| Периклазовые ( $\geq 90 \text{ MgO}$ )                                          | 3,55—3,37                                                    | 0—3          | 26                                         | 17   | 8,3 | 5,6  | 6,2    |
|                                                                                 | 2,84—2,63                                                    | 20—24        | 5,7                                        | 4,8  | 3,4 | 2,7  | 2,7    |
| Форстеритовые ( $50 \leq \text{MgO} \leq 65$ ; $25 \leq \text{SiO}_2 \leq 40$ ) | 3,36—3,19                                                    | 0—3          | 4,5                                        | 3,9  | 3,1 | 2,9  | 3,3*2  |
|                                                                                 | 2,69—2,49                                                    | 20—24        | 3,3                                        | 2,8  | 2,0 | 1,8  | —      |
| Карбидкремниевые на различных связках ( $>70 \text{ SiC}$ )                     | 3,13—2,97                                                    | 0—3          | 35                                         | 32   | 27  | 22   | 19     |
|                                                                                 | 2,50—2,32                                                    | 20—24        | 13                                         | 12   | 9,7 | 8,1  | 7,2*2  |
| Бадделитовые ( $> 90 \text{ ZrO}_2$ )                                           | 5,80—5,51                                                    | 0—3          | 1,8                                        | 1,7  | 1,7 | 1,9  | 2,3    |
| Цирконовые ( $>50 \text{ ZrO}_2$ ; $>25 \text{ SiO}_2$ ):                       |                                                              |              |                                            |      |     |      |        |
| плавленные                                                                      | 3,40—3,14                                                    | 20—24        | 1,8                                        | 1,6  | 1,4 | 1,3  | 1,25*2 |
| поликристаллические                                                             | 4,60—4,37                                                    | 0—3          | 5,7                                        | 5,1  | 4,3 | 3,9  | 4,0    |
|                                                                                 | 3,86—3,59                                                    | 16—20        | 4,6                                        | 4,2  | 3,5 | 3,2  | 3,1    |

\*1 Пористость открытая.

\*2 При  $t = 1500^\circ\text{C}$ .

Таблица 15.24. Теплопроводности высокотемпературных композиций ядерного топлива [22]

| Соединение (массовый состав, %)                                                           | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $T$ , К                                      | $\lambda^{*1}$ , Вт/(м·К)                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| $\text{UO}_2$ , спеченный диоксид [59]                                                    | 10,97                        | 300...600...1000...1600...<br>...2600...3120 | 8,2...5,6...3,7...2,4...<br>...3,3...3,4 |
| $\text{ThO}_2$ , спеченный диоксид, $P = 0\%$                                             | 9,96                         | 400...500...700...1100...1800                | 8,2...6,9...4,6...3,0...2,0              |
| $\text{PuO}_2$ , спеченный диоксид, $P = 0\%$                                             | 11,46                        | 200...300...700...1100...1500                | 7,2...6,3...4,2...3,1...2,2              |
| (50 $\text{UO}_2$ + 50 $\text{PuO}_2$ )                                                   | 11,1                         | 300                                          | 4,3                                      |
| (60 $\text{UO}_2$ + 40 $\text{Al}$ ), спеченная смесь                                     | 4,9                          | 300                                          | 7,0                                      |
| (47 $\text{UO}_2$ + 53 $\text{BeO}$ ), спеченная смесь                                    | 3,2—3,6                      | 300                                          | 23—35                                    |
| (19,9 $\text{UO}_2$ + 80,1 $\text{C}$ ), спеченная смесь                                  | 1,93                         | 300                                          | 18                                       |
| (60 $\text{UO}_2$ + 40 $\text{MO}$ )*2                                                    | —                            | 373...1273                                   | 32...27                                  |
| (50 $\text{UO}_2$ + 50 $\text{W}$ )*2                                                     | —                            | 373...773...1273                             | 52...44...42                             |
| (20 $\text{UO}_2$ + 80 полиэтилен)                                                        | —                            | 273...363                                    | 0,31...0,24                              |
| (20 $\text{UO}_2$ + 60 полиэтилен + 20 сажа)                                              | —                            | 273...363                                    | 0,37...0,33                              |
| $\text{U}_3\text{O}_8$                                                                    | 7,90                         | 300                                          | 6,8                                      |
| $\text{UC}$                                                                               | —                            | 373...673...1100                             | 25...22...27                             |
| $\text{UC}_2$                                                                             | 10,8                         | 473...1873                                   | 13...20                                  |
| (30,3 $\text{UC}$ + 69,7 $\text{C}$ ), спеченная смесь                                    | 2,22                         | 300                                          | 57                                       |
| $\text{UN}$ (94,3 $\text{U}$ ; 5,32 $\text{N}$ ; 0,034 $\text{C}$ ;<br>0,047 $\text{O}$ ) | 14,02                        | 473...1073                                   | 16...21                                  |
| $\text{US}$                                                                               | 10,87                        | 300                                          | 11                                       |
| $\text{PuBe}_{13}$                                                                        | 4,36                         | 300                                          | 90                                       |

\*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

\*2 Объемное содержание, %.

Обозначения:  $P$  — пористость.

Таблица 15.25. Теплопроводности строительных материалов при  $t = (25 \pm 5)^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении [22, 23]

| Материал                                              | $\gamma, \text{г/см}^3$ | $\lambda, \text{Вт/(м·К)}$ |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Алебастровые плиты                                    | 1,25<br>0,84            | 0,47<br>0,27               |
| Асбошифер                                             | 1,9                     | 0,35                       |
| Асфальт                                               | 1,8                     | 0,72                       |
| Бетон в сухом состоянии:                              |                         |                            |
| на песке и кирпичном щебне                            | 1,82                    | 0,70                       |
| на каменном щебне                                     | 2,0                     | 1,3                        |
| железобетон [60]                                      | 2,4                     | 1,6                        |
| пенобетон                                             | 0,3                     | 0,12                       |
| Гипс строительный [60]                                | 0,8<br>1,25             | 0,33<br>0,35               |
| Грунт сухой (влажный) [60]:                           |                         |                            |
| глинистый и суглинки                                  | 1,6<br>2,0              | 0,87 (1,7)<br>1,7 (2,6)    |
| пески и песчаный                                      | 1,6<br>2,0              | 1,1 (1,9)<br>2,0 (3,2)     |
| скальный                                              | 2,0<br>2,4              | 2,0 (2,7)<br>2,3 (3,5)     |
| Гудрон                                                | 0,95                    | 0,30                       |
| Доломит плотный в сухом состоянии                     | 2,48                    | 1,7                        |
| Зола древесного топлива                               | 0,7                     | 0,15                       |
| Известняк плотный в сухом состоянии                   | 2,32                    | 1,9                        |
| Картон:                                               |                         |                            |
| плотный                                               | 1,0                     | 0,23                       |
| обыкновенный                                          | 0,7                     | 0,17                       |
| гофрированный в несколько слоев при толщине слоя 5 мм | 0,09                    | 0,07                       |
| Кирпич в сухом состоянии:                             |                         |                            |
| глиняный                                              | 2,25                    | 1,6                        |
| красный плотный                                       | 1,8                     | 0,67                       |
| красный пористый                                      | 1,2                     | 0,44                       |
| кремнеземный                                          | 0,5                     | 0,12                       |
| силикатный                                            | 1,9                     | 0,81                       |
| трепельный                                            | 1,13                    | 0,27                       |
| шлаковый                                              | 1,4                     | 0,58                       |
| Песок сухой                                           | 1,6                     | 0,87                       |
| Раствор:                                              |                         |                            |
| портландцементный (без песка)                         | 1,8                     | 0,47                       |
| цементно-песчаный                                     | 1,8                     | 1,2                        |
| известково-песчаный                                   | 1,8                     | 0,87                       |
| Рубероид                                              | 0,6                     | 0,17                       |
| Толь бумажный                                         | 0,5                     | 0,23                       |
| Шлак:                                                 |                         |                            |
| котельный                                             | 1,0                     | 0,29                       |
| доменный гранулированный                              | 0,7<br>0,5              | 0,19<br>0,15               |

Таблица 15.26. Теплопроводности древесных материалов [15, 22]

| Материал     | $\gamma, \text{г/см}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda^*, \text{Вт/(м·К)}$ |
|--------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| Бальза       | 0,11—0,13               | 30                  | 0,043—0,052                  |
| Береза       | 0,72                    | 20                  | 0,15                         |
| Дуб          | 0,825                   | 15                  | 0,20                         |
| Ель          | 0,45                    | 60                  | 0,11                         |
| Кедр красный | 0,47                    | 20                  | 0,095                        |

Продолжение табл. 15.26

| Материал                   | $\gamma, \text{г/см}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\lambda^*, \text{Вт/(м·К)}$ |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| Клен                       | 0,72                    | 30                  | 0,19                         |
| Лиственница                | 0,6                     | 20                  | 0,13                         |
| Пробковое дерево           | 0,113                   | 30                  | 0,045                        |
| Сосна:                     |                         |                     |                              |
| поперек волокон            | 0,545                   | 15                  | 0,15                         |
| вдоль волокон              | 0,545                   | 15                  | 0,40                         |
| Тополь                     | 0,58                    | 50                  | 0,17                         |
| Фанера                     | 0,6                     | 20                  | 0,15                         |
| Опилки в качестве засыпки  | 0,25                    | 20                  | 0,093                        |
| Стружка в качестве набивки | 0,30                    | 20                  | 0,12                         |

\*<sup>1</sup> Теплопроводности древесины приведены в направлении, перпендикулярном волокнам. Теплопроводность вдоль волокон в 2—3 раза выше теплопроводности поперек волокон. Влажность материалов 7—10%. Теплопроводность сухой древесины, Вт/(м·К), можно оценить по формуле  $\lambda \approx 0,0232 + 0,174 \gamma$ , где  $\gamma$  — плотность древесины, г/см<sup>3</sup>.

Таблица 15.27. Теплопроводности строительных теплоизоляционных материалов при атмосферном давлении [60]

| Материал                                                      | $\gamma, \text{г/см}^3$ | $t_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, 10^{-3} \text{Вт/(м·К)}$ |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Альголь:                                                      |                         |                                  |                                    |
| гофрированный                                                 | 0,02—0,04               | 350                              | 59 ± 0,26t                         |
| гладкий                                                       | 0,02—0,04               | 350                              | 53 ± 0,22t                         |
| Асбестовый матрац, заполненный:                               |                         |                                  |                                    |
| совелитом                                                     | 0,28                    | 450                              | 87 ± 0,12t                         |
| стекловолокном                                                | 0,20                    | 450                              | 58 ± 0,23t                         |
| вермикулитом                                                  | 0,22                    | 450                              | 81 ± 0,23t                         |
| Асбестовая ткань в несколько слоев                            | 0,5—0,6                 | 450                              | 120 ± 0,26t                        |
| Асбестовермикулитовые изделия (плиты, сегменты, скорлупы)     | 0,25<br>0,30            | 600<br>600                       | 81 ± 0,23t<br>88 ± 0,23t           |
| Вермикулит, вспученный в засыпке                              | 0,23                    | 900                              | 70 ± 0,27t                         |
| Войлок:                                                       |                         |                                  |                                    |
| строительный                                                  | 0,20                    | 100                              | 44 ± 0,19t                         |
| утеплительный                                                 | 0,10                    | 100                              | 60 ± 0,23t                         |
| эластичный из минеральной ваты                                | 0,115                   | 600                              | 43 ± 0,22t                         |
| Вулканитовые изделия (плиты, сегменты, скорлупы)              | 0,35<br>0,40            | 600<br>600                       | 79 ± 0,15t<br>84 ± 0,15t           |
| Диатомитовые изделия                                          | 0,5<br>0,6              | 900<br>900                       | 100 ± 0,23t<br>140 ± 0,23t         |
| Известково-кремнеземистые изделия (плиты, сегменты, скорлупы) | 0,2                     | 600                              | 69 ± 0,15t                         |

Продолжение табл. 15.27

Таблица 15.28. Теплопроводности некоторых теплоизоляционных и вспомогательных материалов [15, 24, 61]

| Материал                                                                | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $t^*$ <sub>max</sub> , °C | $10^{-3} \lambda$ , Вт/(м·K) |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Мастичные материалы:                                                    |                              |                           |                              |
| асбозурит-600                                                           | 0,60                         | 900                       | 160±0,17t                    |
| асботермит                                                              | 0,57                         | 500                       | 130±0,1t                     |
| совелит                                                                 | 0,50                         | 500                       | 99±0,1t                      |
| ньовсель                                                                | 0,37                         | 350                       | 77±0,1t                      |
| Маты и полосы из непрерывного стекловолокна                             | 0,20                         | 450                       | 40±0,26t                     |
| Минеральная вата:                                                       |                              |                           |                              |
| марки 75                                                                | 0,115                        | 600                       | 44±0,29t                     |
| марки 150                                                               | 0,23                         | 600                       | 53±0,19t                     |
| Пенодиатомитовые изделия, кирпич:                                       |                              |                           |                              |
| марки ПД-350                                                            | 0,35                         | 900                       | 81±0,19t                     |
| марки ПД-400                                                            | 0,40                         | 900                       | 93±0,19t                     |
| Перлитовые изделия из керамической связке (плиты, сегменты, скорлупы):  |                              |                           |                              |
| марки 250                                                               | 0,25                         | 900                       | 70±0,19t                     |
| марки 400                                                               | 0,40                         | 900                       | 99±0,19t                     |
| Перлитцементные изделия (получилинды, плиты, сегменты):                 |                              |                           |                              |
| марки 250                                                               | 0,25                         | 600                       | 70±0,19t                     |
| марки 350                                                               | 0,35                         | 600                       | 81±0,19t                     |
| Перлит вспученный мелкий:                                               |                              |                           |                              |
| марки 75                                                                | 0,09                         | 875                       | 52±0,12t                     |
| марки 150                                                               | 0,18                         | 875                       | 58±0,12t                     |
| Пенобетонные изделия                                                    | 0,40                         | 400                       | 110±0,3t                     |
|                                                                         | 0,50                         | 400                       | 130±0,3t                     |
| Пенспласт ФРП-1 и резопен:                                              |                              |                           |                              |
| группы 75                                                               | 0,065—0,085                  | 130                       | 41±0,23t                     |
| группы 100                                                              | 0,086—0,11                   | 150                       | 43±0,19t                     |
| Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем: |                              |                           |                              |
| марки 50                                                                | 0,055—0,075                  | 400                       | 40±0,29t                     |
| марки 175                                                               | 0,15—0,21                    | 400                       | 52±0,2t                      |
| Совелитовые изделия (получилинды, плиты, сегменты):                     |                              |                           |                              |
| марки 350                                                               | 0,35                         | 500                       | 75±0,15t                     |
| марки 400                                                               | 0,40                         | 500                       | 78±0,15t                     |
| Торфоплиты, сегменты, скорлупы                                          | 0,275                        | 100                       | 64±0,15t                     |
|                                                                         | 0,35                         | 100                       | 76±0,15t                     |
| Холст стекловолоконный ВВ-Г                                             | 0,10                         | 180                       | 38±0,15t                     |
| Холсты из микроультрасупертонкого штапельного волокна горных пород      | 0,03—0,07                    | 700                       | 41±0,29t                     |

\*1 Максимальная температура, при которой можно применять материал.

| Материал (массовое содержание, %)                | $\gamma$ , г/см <sup>3</sup> | $t$ , °C    | $10^{-3} \lambda$ , Вт/(м·K) |
|--------------------------------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------|
| Асбест волокнистый                               | 0,47                         | —200...20   | 81...160                     |
|                                                  | 0,70                         | —200...20   | 150...240                    |
| Ацетилцеллюлоза                                  | 1,32                         | 20          | 200...300                    |
| (60 аэрогель-В + 40 алюминиевой пудры)           | 0,18                         | —180<t<20   | 0,35                         |
| Бумага толщиной 75 мкм [22]                      | 0,73                         | 20          | 96                           |
| Вата:                                            |                              |             |                              |
| минеральная                                      | 0,10                         | —200...20   | 16...47                      |
|                                                  | 0,25                         | —100...20   | 36...57                      |
| стеклянная                                       | 0,15                         | —173...27   | 20...52                      |
| хлопковая                                        | 0,05                         | —200...20   | 26...59                      |
|                                                  | 0,081                        | —200...20   | 32...59                      |
| Войлок:                                          |                              |             |                              |
| графитированный (вакуум, d = 10 ÷ 20 мкм)        | 0,04—0,12                    | 1000...1800 | 400...1200                   |
| графитированный углеродный (аргон)               | 0,05—0,10                    | 20...800    | 80...280                     |
| из карбида циркония (аргон, d = 16 мкм, П = 80%) | —                            | 200...1800  | 800...1200                   |
| стеклянный                                       | 0,05                         | —200...20   | 14...44                      |
| Волокно:                                         |                              |             |                              |
| базальтовое                                      | 0,12                         | 20...400    | 38...78                      |
| каолиновое (d = 4 мкм)                           | 0,10                         | 200...1100  | 60...380                     |
| Ипорка <sup>*2</sup>                             | 0,015                        | 20          | 38                           |
| Картон теплоизоляционный БТК-1                   | —                            | —260...0    | 23...39                      |
|                                                  | —                            | 750         | 84                           |
| Каучук:                                          |                              |             |                              |
| натуральный                                      | 0,086                        | 50          | 42                           |
| фторированный ФК-20                              | 0,18                         | —200...20   | 23...59                      |
| вспененный отвержденный                          | 0,082                        | —190...20   | 15...33                      |
| Кожа                                             | 1,0                          | 20          | 170                          |
| Лед                                              | 0,9                          | 0           | 2200                         |
| Майлар (лавсан)                                  | —                            | —200...20   | 110...150                    |
| Пенолегковес высокоглиноземистый (аргон)         | 0,80                         | 200...1400  | 400...480                    |
| Пенопласт:                                       |                              |             |                              |
| ПС-1 (d <sub>пор</sub> = 0,5 мм)                 | 0,10                         | —170...20   | 15...40                      |
| ПС-4 (d <sub>пор</sub> = 1,5 мм)                 | 0,07                         | —170...20   | 18...44                      |
| Пенополиуретан:                                  |                              |             |                              |
| ППУ-104Б                                         | 0,39                         | —170...20   | 38...67                      |
| ППУ-305А                                         | 0,14                         | —100...20   | 25...43                      |
| Пеностекло                                       | 0,17                         | —180...20   | 49...62                      |
|                                                  | 0,25                         | —180...20   | 61...80                      |
| Перлит (воздух, p = 0,13 Па)                     | 0,20                         | —190<t<20   | 0,83                         |



| Материал<br>(массовое содержание, %)                                                                  | $\gamma$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $t$ , °C                        | $\lambda^{*1}$ ,<br>10 <sup>-3</sup> Вт/(м·К) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| Плексиглас аморфный прозрачный                                                                        | 1,174                           | -190...0                        | 150...200                                     |
| Плитка теплоизоляционная ПМТБ-2                                                                       | —                               | -260...<br>...0...750           | 15...36...96                                  |
| Полистирол                                                                                            | 1,06                            | 20                              | 82                                            |
| Поролон                                                                                               | 0,034                           | -190...20                       | 13...40                                       |
| Порошок:                                                                                              |                                 |                                 |                                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( $d=0,21$ мм,<br>$P=51$ %)                                            | —                               | 200...800                       | 360...600                                     |
| MgO ( $d=0,18$ мм,<br>$P=42$ %)                                                                       | —                               | 200...800                       | 480...780                                     |
| ZrO <sub>2</sub> ( $d=0,20$ мм,<br>$P=42$ %)                                                          | —                               | 200...800                       | 250...450                                     |
| Пробка измельченная ( $d \leq 3$ мм)                                                                  | 0,037                           | -200...20                       | 9...34                                        |
|                                                                                                       | 0,161                           | -70...27                        | 36...50                                       |
| Резина;                                                                                               |                                 |                                 |                                               |
| натуральная                                                                                           | —                               | -180...20                       | 11...150                                      |
| синтетическая                                                                                         | —                               | -200...20                       | 120...170                                     |
| Слюда;                                                                                                |                                 |                                 |                                               |
| мусковит,                                                                                             | 2,8                             | 30                              | 550                                           |
| ⊥ плоскости спайности                                                                                 |                                 |                                 |                                               |
| ⊥ плоскости спайности                                                                                 | 2,8                             | 30                              | 3400                                          |
| флогопит, ⊥ плоскости спайности                                                                       | 2,8                             | 20...600                        | 450...570                                     |
| Снег [62]                                                                                             | 0,25                            | 0                               | 160                                           |
| Стеклотекстолит, ⊥ армирующим слоям                                                                   | —                               | -223...20                       | 190...390                                     |
| Тальк (воздух, $p=0,13$ Па)                                                                           | 1,2                             | -180 < $t$ < 20                 | 1,6                                           |
| Тефлон                                                                                                | 2,12                            | -190...10                       | 230...260                                     |
| Ткань:                                                                                                |                                 |                                 |                                               |
| из кварцевого волокна ( $d=6 \div 8$ мкм, толщина слоя 0,4 мм, $\gamma=0,34$ кг/м <sup>2</sup> )      | —                               | 200...<br>...600...1000         | 120...<br>...180...290                        |
| углеродная графитированная (аргон, $d=5$ мкм, толщина слоя 0,45 мм, $\gamma=0,33$ кг/м <sup>2</sup> ) | —                               | 200...<br>...1000...<br>...1800 | 130...<br>...270...460                        |
| Шелк                                                                                                  | 0,10                            | 0                               | 40                                            |
| Эбонит [22]                                                                                           | 1,2                             | 20                              | 160                                           |
| Эбонит вспученный                                                                                     | 0,064                           | -100...20                       | 19...32                                       |
| Экранная теплоизоляция:                                                                               |                                 |                                 |                                               |
| алюминизированная с одной стороны лавсановая пленка толщиной 5—12 мкм с                               | 0,022                           | -200 < $t$ < 20                 | 0,1                                           |

| Материал<br>(массовое содержание, %)                                                                                                                                                                                                            | $\gamma$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $t$ , °C                        | $\lambda^{*1}$ ,<br>10 <sup>-3</sup> Вт/(м·К) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| рифлением 3×<br>×3 мм и стек-<br>ловаль ЭВТИ-7<br>(15 экранов на<br>1 см, $p=10^{-3}$ Па)<br>пенобевая фольга<br>толщиной<br>15 мкм с рифле-<br>нием в виде<br>шаровых сегмен-<br>тов высотой<br>0,05—0,1 мм<br>(20 экранов на<br>1 см, вакуум) | —                               | 800...<br>...1000...<br>...1200 | 42...77...<br>...130                          |

\*1 Теплопроводности монолитных материалов приведены для воздуха при давлении  $1,01 \cdot 10^5$  Па, если среда и давление не указаны явно.

\*2 Белая мягкая пена карбонидных смол.  
Обозначения:  $d$  — диаметр волокон, зерен, пор;  
 $p$  — давление газа;  $P$  — пористость.

Таблица 15.29. Теплопроводности горных пород, Вт/(м·К) [63]

| Порода                        | $\lambda_{cp}$ | $\lambda_{min} - \lambda_{max}$ |
|-------------------------------|----------------|---------------------------------|
| <i>Осадочные породы</i>       |                |                                 |
| Аргиллит, глинистый сланец    | 1,3            | 0,25—3,1                        |
| Глина                         | 1,6            | 0,12—3,1                        |
| Доломит                       | 3,2            | 1,6—6,5                         |
| Известняк                     | 2,3            | 0,64—4,4                        |
| Каменная соль                 | 3,6            | 1,7—5,5                         |
| Мел                           | 1,6            | 0,82—2,2                        |
| Песчаник                      | 1,8            | 0,24—4,4                        |
| Торф                          | 0,07           | —                               |
| Уголь                         | 0,45           | 0,13—2,2                        |
| Ил, глина, песок              | 0,84           | 0,61—2,1                        |
| <i>Магматические породы</i>   |                |                                 |
| Базальт                       | 1,3            | 0,44—3,5                        |
| Гранит                        | 2,4            | 1,1—3,9                         |
| Диабаз                        | 2,5            | 1,7—3,3                         |
| Лава                          | 0,49           | 0,25—0,73                       |
| Обсидиан                      | 1,5            | 1,4—1,6                         |
| Туф                           | 2,3            | 1,3—4,0                         |
| <i>Метаморфические породы</i> |                |                                 |
| Гнейс                         | 2,0            | 0,94—4,9                        |
| Кварцит                       | 5,3            | 2,7—7,6                         |
| Мрамор                        | 2,6            | 1,6—4,0                         |
| Сланец                        | 2,3            | 0,65—4,8                        |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — 2-е изд.: Пер. с англ./Под ред. А. А. Померанцева. М.: Наука, 1964.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
3. Thermal conductivity/Ed. R. P. Tye. Lond.: Acad. Press Inc. 1969. Vol. 1, 2.
4. Ho C. Y., Powell R. W., Liley P. E.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1972. Vol. 1. № 2. P. 279—425.
5. Ho C. Y., Powell R. W., Liley P. E.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3. Suppl. № 1.
6. Теплопроводность жидкостей и газов: Справочные данные. ГСССД/Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Топкий. М.: Изд-во стандартов, 1978.
7. Теплопроводность твердых тел: Справочник/А. С. Охотин, Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаева, А. С. Пущкарский; Под ред. А. С. Охотина. М.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Childs G. E., Hanley H. J. M.//Cryogenics. 1968. Vol. 8, № 2. P. 94—97.
9. Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей: Пер. с англ./Под ред. Е. В. Ступоченко. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
10. Ферштер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах: Пер. с англ./Под ред. Д. Н. Зуборева и А. Г. Башкирова. М.: Мир, 1976.
11. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. — 3-е изд.: Пер. с англ./Под ред. Б. И. Соколова. Л.: Химия, 1982.
12. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. Кинетическая теория. М.: Наука, 1967.
13. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — 2-е изд. М.: Наука, 1972.
14. Теплопроводность многоатомных жидкостей и газов: Обзорная информация/Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Топкий. М.: Изд-во стандартов, 1981.
15. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций: Пер. с фр. М.: Мир, 1968.
16. Филиппов Л. П. Исследование теплопроводности жидкостей. М.: Изд-во МГУ, 1970.
17. Займан Дж. Электроны и фононы. Теория явлений переноса в твердых телах: Пер. с англ./Под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
18. Берман Р. Теплопроводность твердых тел: Пер. с англ./Под ред. В. З. Крессина. М.: Мир, 1979.
19. Могилевский Б. М., Чудновский А. Ф. Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972.
20. Anderson A. C.//Amorphous solids. Low-temperature properties/Ed. W. A. Phillips. Berlin: Springer Verlag, 1981. S. 65—78.
21. Ross R. G., Andersson P., Sundqvist B., Bäckström G.//Rep. Progr. Phys. 1984. Vol. 47. P. 1347—1402.
22. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
23. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. — 2-е изд. М.: Машигиз, 1962.
24. Кожевников И. Г., Новицкий Л. А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник — 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982.
25. Childs G. B., Ericks L. Y., Powell R. W. Thermal conductivity of solids at room temperature and below. A review and compilation of the literature/NBS (US) Monogr. 131, 1973.
26. Зиновьев В. Е., Коршунов И. Г. Теплопроводность и температуропроводность переходных металлов при высоких температурах. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ. М.: ИВТ АН СССР. Ч. 1. 1978. № 1. С. 3—121; Ч. 2. 1979. № 4. С. 3—119.
27. Зиновьев В. Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. М.: Металлургия, 1984.
28. Фегер А., Янош Ш., Петрович П. и др.//Физика низких температур. 1978. Т. 4, № 10. С. 1305—1315.
29. Chuah D. G. C., Ratnalingam R.//J. Low Temp. Phys. 1974. Vol. 14, № 3/4. P. 257—276.
30. Алиев Н. Н., Волькенштейн Н. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1965. Т. 49, вып. 5(11). С. 1450—1452.
31. Cook J. G., van der Meer M. P., Laubitz M. J.//Canad. J. Phys. 1972. Vol. 50, № 12. P. 1386—1401.
32. Campos Tome M. A.//J. Low Temp. Phys. 1975. Vol. 20, № 5/6. P. 677—689.
33. Andrew J. F., Klemens P. G. Thermal conductivity and Lorenz number of plutonium and plutonium-gallium alloys//Proc. 17th Intern. Thermal Conductivity Conf./Ed. J. G. Hust. N. Y.: Plenum Press. 1983. P. 209—218.
34. Ведерников М. В., Кизжаев С. А., Петров А. В. и др.//Физика твердого тела. 1975. Т. 17, вып. 1. С. 340—342.
35. Амасович Е. С., Пелецкий В. З.//Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20, № 5. С. 891—896.
36. Справочник металлста. — 2-е изд./Под ред. Н. С. Асчеркана. М.: Машиностроение, 1965. Т. 1.
37. Геллер Ю. А. Инструментальные стали М: Металлургия, 1975.
38. Жданович В. А., Чашкин Ю. Р.//Измерительная техника. 1976. № 3. С. 28—31.
39. Сергеев О. А.//Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1979. Вып. 13. С. 133—137.
40. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник/Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Машиностроение. 1969.
41. Рогельберг И. Л., Бейли В. М. Сплавы для термпар: Справочник. М.: Металлургия, 1983.
42. White G. K. Experimental techniques in low-temperature physics. — 3d ed. Oxford: Clarendon Press, 1979.
43. Алюминиевые сплавы: Справочное руководство. М.: Металлургия, 1972.
44. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974.
45. Смирягин А. П., Смирягина М. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. — 3-е изд. М.: Металлургия, 1974.
46. Справочник металлста. — 3-е изд./Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Бромстрема. М.: Машиностроение, 1976. Т. 2.
47. Cody G. D., Cohen R. W.//Rev. Mod. Phys. 1964. Vol. 36, № 1 (part 1): P. 121—123.
48. Slack G. A.//Phys. Rev. 1972. Vol. B6, № 10. P. 3791—3800.
49. Whitsett C. R., Nelson D. A., Broerman J. G. et al.//Phys. Rev. 1973. Vol. B7, № 10. P. 4625—4640.
50. Slack G. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34, № 2. P. 321—335.
51. Slack G. A., Aushman S. B.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42, № 12. P. 4713—4717.
52. Jackson H. E., Walker C. T.//Phys. Rev. 1971. Vol. B3, № 4. P. 1428—1439.
53. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1975.
54. Сергеев О. А., Шашков А. Г., Уманский А. С.//Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 43, № 6. С. 960—970.
55. Шадринцев Е. В., Смирнов И. А.//Приборы и техника эксперимента. 1968. № 5. С. 218—219.
56. Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю. Теплофизи-

ческие свойства неметаллических материалов. (Карбиды): Справочная книга. Л.: Энергия, 1977.

57. Литовский Е. Я., Пучкевич Н. А. Теплофизические свойства огнеупоров: Справочник. М.: Металлургия, 1982.

58. Кржижановский Р. Е., Штери З. Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (Оксиды): Справочная книга. Л.: Энергия, 1973.

59. Fink J. K., Chazanov M. G., Leibovitz L./J. Nucl. Mater. 1981. Vol. 102. J. 17—25.

60. Тепловая изоляция: Справочник строителя. — 4-е

изд./Г. Ф. Кузнецов, В. И. Бельский, В. П. Горбачев и др.; Под ред. Г. Ф. Кузнецова. М.: Стройиздат, 1985.

61. Харламов А. Г. Теплопроводность высокотемпературных теплоизоляторов. М.: Атомиздат, 1980.

62. Powell R. L., Childs G. E./American Institute of Physics Handbook. — 3d ed. N. Y.: McGraw-Hill, 1972. Ch. 4g.

63. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика. — 2-е изд./Под ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1984.

## ГЛАВА 16 ВЯЗКОСТЬ

А. В. Елецкий

### 16.1. ВВЕДЕНИЕ

Вязкость текучих тел  $\eta_{xy}$  определяется соотношением Ньютона

$$F_x = -\eta_{xy} \nabla v_y, \quad (16.1)$$

связывающим силу внутреннего трения  $F_x$ , которая действует на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости течения вязкого вещества (газа, жидкости), с градиентом скорости  $\nabla v_y$ . Если рассматриваемый объем, заполненный текучим веществом, не имеет выделенных направлений, которые могут быть обусловлены либо наличием внешних полей, либо преимущественной ориентацией частиц вещества, все компоненты тензора вязкости равны друг другу и вязкость является скаляром. Именно такой случай мы и будем рассматривать в дальнейшем.

Иногда коэффициент  $\eta$  называют динамической вязкостью, отличая его от коэффициента  $\nu = \eta/\rho$  ( $\rho$  — плотность вещества), называемого кинематической вязкостью. Единица динамической вязкости в СИ—Па·с= $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ , кинематической вязкости —  $\text{м}^2/\text{с}$ .

### 16.2. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ

В широком диапазоне изменения давления газа вязкость газа определяется парными соударениями составляющих его частиц. Нижняя граница этого диапазона определяется условием, согласно которому характерная длина пробега частиц газа много меньше размеров рассматриваемой емкости с газом. В случае, если размер емкости  $\sim 10$  см, указанная граница соответствует давлению  $\sim 1$  Па ( $10^{-2}$  мм рт. ст.). Верхняя граница определяется условием идеальности газа, согласно которому длина свободного пробега частиц много больше среднего расстояния между ними  $n^{-1/3}$ . Указанное условие, при выполнении которого роль тройных и других множественных столкновительных процессов по сравнению с процессами парных соударений незначительна, может быть выражено в виде

$$n \ll \sigma^{-3/2}$$

( $\sigma$  — сечение рассеяния частиц). Это условие ограничивает давление значением порядка нескольких десятков мегапаскалей (нескольких сотен атмосфер). Кроме того, условие идеальности газа зависит от температуры и может существенно нарушаться при приближении к тройной точке.

Согласно элементарной кинетической теории газов выражение для вязкости газа, моделируемого шариками с не зависящим от скорости сечением соударения, имеет

вид

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{m \langle v \rangle}{\sigma}, \quad (16.2)$$

где  $m$  — масса частицы газа;  $\langle v \rangle \approx \sqrt{2kT/m}$  — средняя тепловая скорость;  $\sigma$  — сечение рассеяния. В реальной ситуации сечение рассеяния атомов и молекул зависит от скорости (обычно убывает с ростом скорости). В этом случае выражение для вязкости, определяемое на основании решения кинетического уравнения Больцмана, имеет значительно более сложный вид, тем не менее из этого выражения, так же как и из элементарной теории (16.2), следует, что вязкость в широком диапазоне изменения давления практически от давления не зависит\* и возрастает с температурой более резко, чем по закону  $T^{1/2}$ .

В табл. 16.1, 16.2 приведены значения вязкости газообразных веществ. Эти значения получены в результате усреднения большого количества экспериментальных данных и соответствуют условиям, когда изменение давления газа не приводит к изменению вязкости в пределах погрешности эксперимента (0,1—1%). Такая ситуация имеет место при давлениях ниже атмосферного. Характер зависимости вязкости от давления виден из табл. 16.3, 16.4, где приведены значения вязкости азота и водорода при различных температуре и давлении [2]. Погрешность данных, приведенных в табл. 16.1—16.4, не превышает нескольких процентов.

Вязкость смеси двух газов может немонотонным образом зависеть от ее парциального состава. Это следует как из прямых экспериментов, так и из результатов кинетической теории [3]. Немонотонность проявляется, в частности, в зависимости вязкости частично диссоциированных молекулярных газов от температуры и давления. Изменение температуры и давления газа вызывает изменение степени его диссоциации, т. е. парциального состава, а это в свою очередь сказывается на значении вязкости. В табл. 16.5—16.10 приведены значения вязкости наиболее широко распространенных молекулярных газов при различных давлении и температуре в условиях, когда газ является частично диссоциированным. В табл. 16.11—16.14 приведены значения вязкости некоторых бинарных газовых смесей при различных температуре и парциальном составе. Погрешность приведенных данных — порядка 1%. В табл. 16.15 представлены значения вязкости частично диссоциированного воздуха.

\* Зависимость вязкости от давления возникает при наличии в газе процессов ассоциации, изменяющих число частиц в системе.

Таблица 16.1. Вязкость газов при атмосферном давлении и различной температуре,  $10^{-6}$  Па·с  
(погрешность данных 1—10%) [1, 2, 4]

| $T, K$ | He   | Ne   | Ar   | Kr   | Xe   | H <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | F <sub>2</sub> | Cl <sub>2</sub> |
|--------|------|------|------|------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 60     | 7,06 | 9,63 | 5,34 | —    | —    | 2,91           | 3,86           | —              | —              | —              | —               |
| 80     | 8,41 | 12,1 | 6,83 | —    | —    | 3,60           | 4,88           | 5,59           | 6,27           | —              | —               |
| 100    | 9,63 | 14,4 | 8,34 | 9,29 | —    | 4,21           | 5,79           | 6,87           | 7,68           | 8,56           | —               |
| 150    | 12,3 | 19,4 | 12,3 | 13,4 | 12,2 | 5,57           | 7,77           | 10,0           | 11,3           | 12,9           | —               |
| 200    | 15,0 | 23,9 | 16,0 | 17,6 | 15,8 | 6,78           | 9,55           | 12,9           | 14,6           | 16,8           | —               |
| 250    | 17,5 | 28,0 | 19,5 | 21,6 | 19,6 | 7,90           | 11,2           | 15,5           | 17,8           | 20,3           | —               |
| 300    | 19,9 | 31,7 | 22,7 | 25,5 | 23,3 | 8,94           | 12,7           | 17,9           | 20,7           | 23,6           | 13,7            |
| 400    | 24,3 | 38,4 | 28,5 | 32,7 | 30,4 | 10,9           | 15,5           | 22,1           | 25,9           | 29,5           | 18,0            |
| 500    | 28,3 | 44,5 | 33,6 | 39,1 | 36,8 | 12,7           | 18,0           | 25,9           | 30,5           | 34,8           | 22,1            |
| 600    | 32,0 | 50,0 | 38,3 | 45,0 | 42,9 | 14,5           | —              | 29,3           | 34,7           | —              | 25,8            |
| 800    | 38,8 | 60,0 | 46,4 | 55,4 | 53,7 | 17,7           | —              | 35,2           | 42,1           | —              | 32,6            |
| 1000   | 45,0 | 68,9 | 53,5 | 64,5 | 63,2 | 20,7           | —              | 40,4           | 48,5           | —              | —               |
| 1500   | 58,6 | —    | 68,4 | 83,6 | 83,3 | 27,6           | —              | —              | 61,9           | —              | —               |
| 2000   | 70,7 | —    | 80,7 | —    | —    | 33,6           | —              | —              | 73,1           | —              | —               |
| 2200   | 74,2 | —    | 85,1 | —    | —    | —              | —              | —              | —              | —              | —               |

Продолжение табл. 16.1

| $T, K$ | CO   | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | COS  | CS <sub>2</sub> | HCN  | C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> | SiH <sub>4</sub> | Воздух | PH <sub>3</sub> | CCl <sub>4</sub> |
|--------|------|-----------------|------------------|------|-----------------|------|-------------------------------|------------------|--------|-----------------|------------------|
| 60     | —    | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | —      | —               | —                |
| 80     | 5,40 | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | —      | —               | —                |
| 100    | 6,70 | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 7,11   | —               | —                |
| 150    | 9,84 | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 10,3   | —               | —                |
| 200    | 12,7 | 10,2            | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 13,2   | —               | —                |
| 250    | 15,4 | 12,6            | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 16,0   | —               | —                |
| 300    | 17,8 | 15,0            | 13,0             | 12,5 | 10,1            | 7,58 | 10,2                          | 11,7             | 18,5   | 11,8            | 9,9              |
| 400    | 22,1 | 19,5            | 17,3             | 16,6 | 13,6            | 10,8 | 13,7                          | 15,3             | 23,0   | 15,6            | 13,0             |
| 500    | 25,9 | 23,6            | —                | 20,4 | 16,9            | 13,9 | —                             | 18,9             | 27,0   | 19,1            | 16,0             |
| 600    | 29,4 | 33,9            | —                | —    | 20,2            | —    | —                             | —                | 30,6   | —               | 19,0             |
| 800    | 35,4 | 39,5            | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 37,0   | —               | —                |
| 1000   | 40,6 | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 42,4   | —               | —                |
| 1500   | 51,6 | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 53     | —               | —                |
| 2000   | —    | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 63     | —               | —                |
| 2200   | —    | —               | —                | —    | —               | —    | —                             | —                | 67     | —               | —                |

Продолжение табл. 16.1

| $T, K$ | Br <sub>2</sub> | T <sub>2</sub> | NH <sub>3</sub> | BF <sub>3</sub> | HCl  | HI   | H <sub>2</sub> S | NO   | NO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O |
|--------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|------|------------------|------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 60     | —               | —              | —               | —               | —    | —    | —                | —    | —               | —                | —               | —                |
| 80     | —               | —              | —               | —               | —    | —    | —                | —    | —               | —                | —               | —                |
| 100    | —               | —              | —               | —               | —    | —    | —                | —    | —               | —                | —               | —                |
| 150    | —               | —              | —               | —               | —    | —    | —                | 10,5 | —               | —                | —               | —                |
| 200    | —               | —              | 6,89            | 12,1            | —    | —    | —                | 13,6 | —               | 10,0             | 8,62            | —                |
| 250    | —               | —              | 8,53            | 14,6            | 12,1 | 15,9 | —                | 16,6 | —               | 12,6             | 10,8            | —                |
| 300    | 15,5            | —              | 10,3            | 17,1            | 14,6 | 19,0 | 12,6             | 19,3 | 13,0            | 15,0             | 13,0            | 9,13             |
| 400    | 20,3            | 18,6           | 13,9            | 21,7            | 19,6 | 25,1 | 16,9             | 24,1 | 21,3            | 19,5             | 17,3            | 13,2             |
| 500    | 25,1            | 23,0           | 17,6            | 26,1            | 24,3 | 31,0 | 20,8             | 28,4 | —               | 23,6             | 21,3            | 17,3             |
| 600    | 29,9            | 27,2           | 21,4            | 30,2            | 28,8 | 36,7 | —                | 32,3 | —               | 27,3             | 25,1            | 21,3             |
| 800    | 39,2            | —              | 28,8            | —               | —    | —    | —                | 39,0 | —               | 34,1             | 32,1            | 29,5             |
| 1000   | —               | —              | 35,9            | —               | —    | —    | —                | 44,9 | —               | 40,0             | 38,4            | 37,6             |
| 1500   | —               | —              | —               | —               | —    | —    | —                | 57,3 | —               | 52,5             | —               | —                |
| 2000   | —               | —              | —               | —               | —    | —    | —                | —    | —               | —                | —               | —                |
| 2200   | —               | —              | —               | —               | —    | —    | —                | —    | —               | —                | —               | —                |

Таблица 16.2. Вязкость газообразных углеводородов и их производных при атмосферном давлении,  $10^{-6}$  Па·с [1, 2]

| Газ                              | Температура $T$ , К |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                  | 200                 | 250  | 300  | 400  | 500  | 600  | 800  | 1000 |
| Ацетон $C_3H_6O$                 | —                   | 6,78 | 7,77 | 10,1 | 12,8 | 15,5 | —    | —    |
| Апетилен $C_2H_2$                | —                   | —    | 10,3 | 13,5 | 16,4 | 19,1 | —    | —    |
| Бензол $C_6H_6$                  | —                   | —    | 7,65 | 10,2 | 12,7 | 15,1 | —    | —    |
| Бромметан $CH_3Br$               | —                   | 13,2 | 15,8 | 20,2 | 24,3 | —    | —    | —    |
| изо-Бутан $изо-C_4H_{10}$        | —                   | —    | 7,60 | 10,0 | 12,3 | 14,0 | 17,5 | —    |
| <i>n</i> -Бутан $n-C_4H_{10}$    | —                   | —    | 7,57 | 9,96 | 12,3 | 14,5 | 18,2 | —    |
| Тетрахлорметан $CCl_4$           | —                   | —    | 9,97 | 13,2 | 16,1 | 18,8 | 23,7 | —    |
| Тетрафторметан $CF_4$            | —                   | 14,9 | 17,5 | 22,1 | 26,2 | —    | —    | —    |
| Пентафторхлорэтан $C_2F_5Cl$     | —                   | —    | 12,8 | 16,5 | 20,0 | —    | —    | —    |
| Трифторхлорметан $CF_3Cl$        | —                   | 12,4 | 14,5 | 18,9 | 23,4 | —    | —    | —    |
| Дифтордихлорметан $CF_2Cl_2$     | —                   | 10,6 | 12,6 | 16,4 | 19,8 | —    | —    | —    |
| Дихлорфторметан $CHCl_2F$        | —                   | —    | 11,6 | 15,3 | 18,8 | —    | —    | —    |
| Дихлортетрафторэтан $C_2Cl_2F_4$ | —                   | 10,0 | 11,6 | 15,0 | 18,4 | —    | —    | —    |
| Этан $C_2H_6$                    | 6,43                | 7,96 | 9,45 | 12,2 | 14,8 | 17,2 | 21,4 | 25,1 |
| Этанол $C_2H_5OH$                | —                   | —    | 9,0  | 11,8 | 14,1 | 16,9 | —    | —    |
| Этилен $C_2H_4$                  | 7,1                 | 8,8  | 10,4 | 13,5 | 16,3 | 18,8 | 23,4 | 27,5 |
| Диэтилэфир $C_4H_{10}O$          | —                   | 6,3  | 7,6  | 10,1 | 12,5 | 14,7 | —    | —    |
| <i>n</i> -Гептан $n-C_7H_{16}$   | —                   | —    | 6,1  | 7,9  | 9,8  | 11,6 | —    | —    |
| <i>n</i> -Гексан $n-C_6H_{14}$   | —                   | —    | 6,7  | 8,7  | 10,8 | 12,8 | 16,5 | 19,6 |
| Метан $CH_4$                     | 7,76                | 9,53 | 11,2 | 14,2 | 17,0 | 19,4 | 23,8 | 27,6 |
| Метанол $CH_3OH$                 | —                   | 8,3  | 9,9  | 13,1 | 16,5 | 19,8 | —    | —    |
| Хлорметан $CH_3Cl$               | —                   | 9,29 | 11,0 | 14,5 | 17,9 | 21,3 | —    | —    |
| <i>n</i> -Октан $n-C_8H_{18}$    | —                   | —    | —    | 7,40 | 9,2  | 10,9 | —    | —    |
| изо-Пентан $изо-C_5H_{12}$       | —                   | —    | —    | 9,60 | 12,0 | 14,3 | 16,8 | —    |
| <i>n</i> -Пентан $n-C_5H_{12}$   | —                   | —    | —    | 9,23 | 11,4 | 13,4 | 16,8 | —    |
| <i>n</i> -Пропан $n-C_3H_8$      | —                   | —    | 8,25 | 10,8 | 13,3 | 15,6 | —    | —    |
| Пропилен $C_3H_6$                | —                   | 7,28 | 8,78 | 11,5 | 14,1 | 16,5 | —    | —    |
| Пропан $C_3H_8$                  | —                   | 7,1  | 8,3  | 9,48 | 11,7 | 5,2  | 17,1 | —    |
| Трихлорфторметан $CCl_3F$        | —                   | 9,42 | 11,0 | 14,3 | 17,8 | —    | —    | —    |
| Трихлортрифторэтан $C_2Cl_3F_3$  | —                   | 9,13 | 10,4 | 12,5 | —    | —    | —    | —    |
| Трифторметан $CHF_3$             | —                   | 12,4 | 14,9 | 19,6 | 23,8 | —    | —    | —    |
| Бромтрифторметан $CBrF_3$        | —                   | —    | 15,0 | 19,8 | —    | —    | —    | —    |
| изо-Пропанол $изо-C_3H_8O$       | —                   | —    | —    | —    | 13,1 | —    | —    | —    |
| <i>n</i> -Пропанол $n-C_3H_8O$   | —                   | —    | —    | 10,6 | 13,2 | —    | —    | —    |

Таблица 16.3. Вязкость газообразного азота при различных температуре и давлении,  $10^{-6}$  Па·с [3]

| $T$ , К | Давление, $10^6$ Па |      |      |      |      |      |      |
|---------|---------------------|------|------|------|------|------|------|
|         | 1                   | 10   | 50   | 100  | 150  | 200  | 400  |
| 80      | 5,52                | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 100     | 6,88                | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| 120     | 8,21                | 8,68 | —    | —    | —    | —    | —    |
| 140     | 9,45                | 9,83 | 15,5 | —    | —    | —    | —    |
| 160     | 10,6                | 11,0 | 13,4 | 22,1 | 31,3 | 38,4 | 59,0 |
| 180     | 11,8                | 12,1 | 13,8 | 18,3 | 24,5 | 30,4 | 49,0 |
| 200     | 12,9                | 13,1 | 14,5 | 17,5 | 21,7 | 26,2 | 42,3 |
| 250     | 15,5                | 15,7 | 16,6 | 18,2 | 20,4 | 22,7 | 33,5 |
| 300     | 17,8                | 18,0 | 18,7 | 19,8 | 21,3 | 22,9 | 30,4 |
| 400     | 22,0                | 22,2 | 22,7 | 23,4 | 24,2 | 25,2 | 29,6 |
| 500     | 25,8                | 25,9 | 26,3 | 26,8 | 27,4 | 28,1 | 31,1 |
| 600     | 29,1                | 29,2 | 29,5 | 29,9 | 30,4 | 30,9 | 33,2 |
| 700     | 32,1                | 32,2 | 32,4 | 32,8 | 33,2 | 33,6 | 35,5 |
| 800     | 34,9                | 35,0 | 35,2 | 35,5 | 35,8 | 36,2 | 37,8 |
| 900     | 37,5                | 37,6 | 37,8 | 38,1 | 38,4 | 38,6 | 40,0 |
| 1000    | 40,0                | 40,0 | 40,2 | 40,5 | 40,7 | 41,0 | 41,6 |
| 1100    | 42,3                | 42,4 | 42,5 | 42,8 | 43,0 | 43,2 | 44,3 |
| 1200    | 44,5                | 44,6 | 44,7 | 44,9 | 45,1 | 45,4 | 46,3 |
| 1300    | 46,6                | 46,7 | 46,8 | 47,0 | 47,2 | 47,4 | 48,2 |

Таблица 16.4. Вязкость газообразного водорода при различных давлении и температуре,  $10^{-6}$  Па·с [3]

| $T$ , К | Давление, $10^6$ Па |      |      |      |      |      |
|---------|---------------------|------|------|------|------|------|
|         | 1                   | 10   | 20   | 50   | 100  | 500  |
| 30      | 1,6                 | —    | —    | —    | —    | —    |
| 50      | 2,49                | 2,54 | 2,80 | 4,20 | 6,25 | 17,4 |
| 100     | 4,21                | 4,23 | 4,24 | 4,42 | 5,0  | 9,95 |
| 200     | 6,81                | 6,82 | 6,85 | 6,91 | 7,06 | 9,13 |
| 300     | 8,96                | 8,96 | 8,98 | 9,02 | 9,10 | 10,3 |
| 500     | 12,6                | 12,6 | 12,6 | 12,7 | 12,7 | 13,3 |
| 750     | 16,6                | 16,6 | 16,6 | 16,6 | 16,6 | 17,0 |
| 1000    | 20,1                | 20,1 | 20,1 | 20,2 | 20,2 | 20,4 |

Таблица 16.5. Вязкость частично диссоциированного водорода,  $10^{-6}$  Па·с [3]

| T, $10^3$ K | Давление, Па |        |        |        |        |        |                |
|-------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
|             | $10^2$       | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $10^6$ | $10^7$ | $2 \cdot 10^7$ |
| 1,8         | 29,6         | 29,6   | 29,6   | 29,6   | 29,6   | 29,6   | 29,6           |
| 2,0         | 32,0         | 31,9   | 31,8   | 31,8   | 31,8   | 31,8   | 31,8           |
| 2,2         | 34,8         | 24,4   | 24,2   | 24,2   | 24,2   | 24,2   | 24,2           |
| 2,4         | 37,3         | 37,2   | 36,8   | 36,6   | 36,6   | 36,6   | 36,6           |
| 2,6         | 37,7         | 40,0   | 39,6   | 39,2   | 39,0   | 39,0   | 39,0           |
| 2,8         | 34,2         | 37,6   | 42,1   | 42,3   | 41,8   | 41,5   | 41,5           |
| 3,0         | 36,8         | 41,3   | 44,9   | 44,7   | 44,2   | 44,0   | 43,9           |
| 3,2         | 38,1         | 40,7   | 46,4   | 47,6   | 46,9   | 46,5   | 46,4           |
| 3,4         | 39,6         | 41,1   | 46,4   | 50,1   | 49,7   | 49,1   | 50,0           |
| 3,6         | 41,7         | 42,3   | 46,0   | 51,9   | 52,4   | 51,7   | 51,5           |
| 3,8         | 43,5         | 43,8   | 46,0   | 52,7   | 55,1   | 54,4   | 54,1           |
| 4,0         | 45,3         | 45,4   | 46,7   | 52,7   | 57,5   | 57,1   | 56,8           |
| 4,2         | 47,1         | 47,2   | 47,9   | 52,6   | 59,3   | 59,8   | 59,5           |
| 4,4         | 48,9         | 48,9   | 49,4   | 52,7   | 60,5   | 62,5   | 62,2           |
| 4,6         | 50,6         | 50,6   | 50,9   | 53,2   | 61,1   | 65,0   | 64,9           |
| 4,8         | 52,4         | 52,4   | 52,6   | 54,1   | 61,4   | 67,3   | 67,4           |
| 5,0         | 54,1         | 54,1   | 54,3   | 55,3   | 61,5   | 69,2   | 69,8           |
| 5,2         | 55,9         | 55,9   | 56,0   | 56,7   | 61,8   | 70,9   | 72,0           |
| 5,4         | 57,7         | 57,7   | 57,7   | 58,3   | 62,3   | 72,1   | 73,9           |
| 5,6         | 59,5         | 59,5   | 59,6   | 59,9   | 63,1   | 74,0   | 75,5           |
| 5,8         | 61,4         | 61,4   | 61,4   | 61,7   | 64,1   | 73,8   | 76,8           |
| 6,0         | 63,3         | 63,3   | 63,3   | 63,5   | 65,4   | 74,5   | 77,4           |

Таблица 16.6. Вязкость частично диссоциированного водяного пара,  $10^{-5}$  Па·с [3]

| T, $10^3$ K | Давление, $10^5$ Па |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | 0,1                 | 0,4  | 1,0  | 5,0  | 20   | 40   | 60   | 100  |
| 1,8         | 6,12                | 6,12 | 6,12 | 6,12 | 6,12 | 6,12 | 6,12 | 6,12 |
| 2,0         | 6,57                | 6,58 | 6,59 | 6,59 | 6,60 | 6,60 | 6,60 | 6,60 |
| 2,2         | 6,98                | 7,02 | 7,03 | 7,04 | 7,05 | 7,06 | 7,06 | 7,06 |
| 2,4         | 7,31                | 7,39 | 7,42 | 7,46 | 7,49 | 7,49 | 7,50 | 7,50 |
| 2,6         | 7,52                | 7,67 | 7,75 | 7,84 | 7,89 | 7,90 | 7,91 | 7,92 |
| 2,8         | 7,54                | 7,84 | 7,98 | 8,15 | 8,24 | 8,28 | 8,29 | 8,31 |
| 3,0         | 7,56                | 7,90 | 8,10 | 8,38 | 8,54 | 8,60 | 8,63 | 8,65 |
| 3,2         | 7,63                | 7,78 | 8,14 | 8,52 | 8,77 | 8,86 | 8,91 | 8,96 |
| 3,4         | 7,95                | 7,96 | 8,16 | 8,59 | 8,93 | 9,06 | 9,13 | 9,21 |
| 3,6         | 8,44                | 8,22 | 8,25 | 8,63 | 9,03 | 9,20 | 9,30 | 9,41 |
| 3,8         | 9,03                | 8,67 | 8,51 | 8,68 | 9,08 | 9,29 | 9,41 | 9,55 |
| 4,0         | 9,53                | 9,22 | 8,95 | 8,82 | 9,14 | 9,36 | 9,49 | 9,65 |
| 4,2         | 9,97                | 9,76 | 9,49 | 9,09 | 9,22 | 9,42 | 9,55 | 9,73 |
| 4,4         | 10,3                | 10,2 | 10,0 | 9,50 | 9,39 | 9,52 | 9,63 | 9,80 |
| 4,6         | 10,8                | 10,7 | 10,6 | 9,99 | 9,65 | 9,68 | 9,75 | 9,89 |
| 4,8         | 11,2                | 11,1 | 11,0 | 10,6 | 10,0 | 9,93 | 9,94 | 10,0 |
| 5,0         | 11,6                | 11,6 | 11,4 | 11,0 | 10,4 | 10,2 | 10,2 | 10,2 |
| 5,2         | 11,9                | 11,9 | 11,8 | 11,6 | 10,9 | 10,7 | 10,6 | 10,5 |
| 5,4         | 12,3                | 12,2 | 12,2 | 12,0 | 11,5 | 11,2 | 11,0 | 10,8 |
| 5,6         | 12,6                | 12,6 | 12,6 | 12,4 | 12,0 | 11,6 | 11,4 | 11,2 |
| 5,8         | 13,0                | 13,0 | 13,0 | 12,8 | 12,5 | 12,2 | 12,0 | 11,7 |
| 6,0         | 13,4                | 13,4 | 13,4 | 13,2 | 13,0 | 12,6 | 12,4 | 12,2 |

Таблица 16.7. Вязкость частично диссоциированной двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ ,  $10^{-6}$  Па·с [3]

| T, $10^3$ K | Давление, Па |        |        |
|-------------|--------------|--------|--------|
|             | $10^3$       | $10^5$ | $10^7$ |
| 1,6         | 56,4         | 56,4   | 56,4   |
| 1,8         | 61,5         | 61,4   | 61,4   |
| 2,0         | 66,7         | 66,3   | 66,2   |
| 2,2         | 74,3         | 71,2   | 70,9   |
| 2,4         | 79,0         | 76,2   | 75,5   |
| 2,6         | 86,6         | 81,7   | 80,2   |
| 2,8         | 94,2         | 87,9   | 84,9   |
| 3,0         | 101          | 94,8   | 89,9   |
| 3,2         | 106          | 102    | 95,2   |
| 3,4         | 111          | 109    | 101    |
| 3,6         | 116          | 116    | 107    |
| 3,8         | 122          | 122    | 113    |
| 4,0         | 127          | 128    | 120    |

Таблица 16.8. Вязкость частично диссоциированного азота,  $10^{-6}$  Па·с [3]

| T, $10^3$ K | Давление, Па |        |        |        |        |        |
|-------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | $10^2$       | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $10^6$ | $10^7$ |
| 3,6         | 106          | 106    | 106    | 106    | 106    | 106    |
| 3,8         | 111          | 111    | 111    | 111    | 111    | 111    |
| 4,0         | 116          | 115    | 115    | 115    | 115    | 115    |
| 4,2         | 120          | 120    | 120    | 120    | 120    | 120    |
| 4,4         | 125          | 125    | 124    | 124    | 124    | 124    |
| 4,6         | 130          | 129    | 129    | 129    | 129    | 129    |
| 4,8         | 136          | 134    | 134    | 134    | 134    | 134    |
| 5,0         | 142          | 139    | 138    | 138    | 138    | 138    |
| 5,2         | 149          | 144    | 143    | 143    | 143    | 143    |
| 5,4         | 155          | 149    | 147    | 147    | 147    | 147    |
| 5,6         | 162          | 155    | 152    | 152    | 152    | 152    |
| 5,8         | 167          | 162    | 157    | 156    | 156    | 156    |
| 6,0         | 172          | 168    | 162    | 161    | 161    | 161    |

Таблица 16.9. Вязкость частично диссоциированного кислорода,  $10^{-6}$  Па·с [3]

| T, $10^3$ K | Давление, Па |        |        |        |        |        |
|-------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | $10^2$       | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $10^6$ | $10^7$ |
| 2,0         | 73,7         | 73,6   | 73,5   | 73,5   | 73,5   | 73,5   |
| 2,2         | 79,1         | 78,6   | 78,4   | 78,3   | 78,3   | 78,3   |
| 2,4         | 85,9         | 84,0   | 83,3   | 83,0   | 82,9   | 82,9   |
| 2,6         | 93,9         | 90,6   | 88,6   | 87,8   | 87,6   | 87,5   |
| 2,8         | 100          | 98,6   | 94,8   | 92,0   | 92,2   | 92,0   |
| 3,0         | 104          | 106    | 102    | 98,6   | 97,0   | 96,5   |
| 3,2         | 108          | 111    | 111    | 105    | 102    | 101    |
| 3,4         | 112          | 114    | 118    | 113    | 108    | 106    |
| 3,6         | 117          | 118    | 122    | 121    | 115    | 111    |
| 3,8         | 122          | 123    | 126    | 129    | 122    | 116    |
| 4,0         | 127          | 127    | 129    | 135    | 130    | 133    |
| 4,2         | 132          | 132    | 133    | 139    | 138    | 129    |
| 4,4         | 139          | 137    | 138    | 142    | 146    | 136    |
| 4,6         | 142          | 142    | 142    | 145    | 152    | 145    |
| 4,8         | 146          | 146    | 147    | 149    | 156    | 153    |

| T, $10^3$ К | Давление, Па |        |        |        |        |        |
|-------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | $10^2$       | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $10^6$ | $10^7$ |
| 5,0         | 151          | 151    | 151    | 153    | 160    | 161    |
| 5,2         | 156          | 156    | 156    | 157    | 163    | 168    |
| 5,4         | 160          | 160    | 160    | 161    | 166    | 174    |
| 5,6         | 165          | 165    | 165    | 166    | 170    | 180    |
| 5,8         | 170          | 170    | 170    | 170    | 173    | 184    |
| 6,0         | 174          | 174    | 174    | 174    | 177    | 188    |

| T, $10^3$ К | Давление, Па |        |        |
|-------------|--------------|--------|--------|
|             | $10^3$       | $10^6$ | $10^7$ |
| 1,0         | 58,7         | 57,8   | 57,5   |
| 1,2         | 71,6         | 67,4   | 65,8   |
| 1,4         | 85,7         | 79,6   | 75,0   |
| 1,6         | 95,5         | 92,1   | 85,5   |
| 1,8         | 104          | 102    | 95,6   |
| 2,0         | 114          | 114    | 109    |
| 2,2         | 122          | 127    | 120    |
| 2,4         | 130          | 130    | 128    |
| 2,6         | 137          | 137    | 137    |
| 2,8         | 143          | 143    | 143    |
| 3,0         | 152          | 152    | 152    |
| 4,0         | 185          | 185    | 185    |
| 5,0         | 217          | 217    | 217    |
| 6,0         | 247          | 247    | 247    |

Таблица 16.11. Вязкость смеси Ag — Ne при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ag,  $10^{-6}$  Па·с [1]

| Молярная доля Ag | Температура, К |      |       |       |      |      |      |      |      |
|------------------|----------------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
|                  | 72,0           | 90,2 | 192,5 | 229,5 | 293  | 373  | 456  | 473  | 523  |
| 0                | 7,98           | 9,12 | 14,5  | 16,4  | 19,7 | 23,2 | 16,9 | 27,2 | 29,0 |
| 0,05             | 8,23           | 9,40 | 15,4  | 17,6  | 20,6 | 23,8 | 28,3 | 27,8 | 29,8 |
| 0,10             | 8,34           | 9,60 | 16,0  | 17,9  | 21,3 | 24,4 | 29,2 | 28,4 | 30,6 |
| 0,15             | 8,37           | 9,70 | 16,4  | 18,4  | 21,8 | 25,0 | 29,9 | 29,0 | 31,4 |
| 0,20             | 8,37           | 9,74 | 16,6  | 18,8  | 22,2 | 25,6 | 30,5 | 29,5 | 32,1 |
| 0,25             | 8,32           | 9,70 | 16,8  | 19,0  | 22,5 | 26,0 | 31,0 | 30,0 | 32,7 |
| 0,30             | 8,24           | 9,60 | 16,2  | 19,2  | 22,7 | 26,4 | 31,3 | 31,4 | 33,2 |
| 0,35             | 8,13           | 9,47 | 16,9  | 19,2  | 22,8 | 26,8 | 31,6 | 31,8 | 33,6 |
| 0,40             | 8,00           | 9,32 | 16,8  | 19,1  | 22,9 | 27,0 | 31,9 | 32,2 | 34,0 |
| 0,45             | 7,85           | 9,17 | 16,7  | 19,0  | 22,9 | 27,2 | 32,1 | 31,4 | 34,3 |
| 0,50             | 7,70           | 9,03 | 16,6  | 18,9  | 23,0 | 27,4 | 32,2 | 31,7 | 34,5 |
| 0,55             | 7,54           | 8,90 | 16,4  | 18,8  | 23,0 | 27,5 | 32,4 | 31,9 | 34,7 |
| 0,60             | 7,40           | 8,76 | 16,3  | 18,8  | 22,9 | 27,5 | 32,4 | 32,0 | 34,8 |
| 0,65             | 7,24           | 8,63 | 16,2  | 18,7  | 22,9 | 27,5 | 32,5 | 32,1 | 34,9 |
| 0,70             | 7,09           | 8,49 | 16,1  | 18,6  | 22,8 | 27,5 | 32,5 | 32,2 | 35,0 |
| 0,75             | 6,95           | 8,35 | 16,0  | 18,5  | 22,7 | 27,4 | 32,5 | 32,2 | 35,0 |
| 0,80             | 6,82           | 8,21 | 15,9  | 18,3  | 22,6 | 27,3 | 32,5 | 32,2 | 34,9 |
| 0,85             | 6,70           | 8,07 | 15,8  | 18,2  | 22,5 | 27,2 | 32,4 | 32,2 | 34,8 |
| 0,90             | 6,57           | 7,93 | 15,7  | 18,0  | 22,4 | 27,1 | 32,4 | 32,2 | 34,8 |
| 0,95             | 6,50           | 7,80 | 15,6  | 17,9  | 22,3 | 27,0 | 32,4 | 32,1 | 34,6 |
| 1,00             | 6,35           | 7,68 | 15,5  | 17,7  | 22,1 | 26,8 | 32,3 | 32,1 | 34,5 |

Таблица 16.12. Вязкость смеси Ag — Ne при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ag,  $10^{-6}$  Па·с [1]

| Молярная доля Ag | Температура, К |      |       |      |      |      |      |      |
|------------------|----------------|------|-------|------|------|------|------|------|
|                  | 72,3           | 90,3 | 193,4 | 229  | 293  | 373  | 473  | 523  |
| 0                | 11,7           | 13,5 | 23,5  | 26,7 | 30,9 | 36,2 | 42,2 | 45,0 |
| 0,05             | 11,4           | 13,1 | 23,0  | 26,2 | 30,4 | 35,6 | 41,6 | 44,3 |
| 0,10             | 11,0           | 12,8 | 22,4  | 25,6 | 29,8 | 35,1 | 41,0 | 43,6 |
| 0,15             | 10,6           | 12,4 | 21,9  | 25,1 | 29,3 | 34,4 | 40,3 | 43,0 |
| 0,20             | 10,3           | 12,0 | 21,4  | 24,6 | 28,8 | 33,9 | 39,7 | 42,4 |
| 0,25             | 10,0           | 11,7 | 20,9  | 24,1 | 28,3 | 33,4 | 39,1 | 41,7 |
| 0,30             | 9,66           | 11,3 | 20,4  | 23,6 | 27,8 | 32,8 | 38,6 | 41,1 |
| 0,35             | 9,35           | 11,0 | 20,0  | 23,2 | 27,3 | 32,3 | 38,0 | 40,6 |

| Молярная<br>доля Ag | Температура, К |      |       |      |      |      |      |      |
|---------------------|----------------|------|-------|------|------|------|------|------|
|                     | 72,3           | 90,3 | 193,4 | 229  | 293  | 373  | 473  | 523  |
| 0,40                | 9,06           | 10,7 | 19,5  | 22,7 | 26,8 | 31,8 | 37,4 | 40,0 |
| 0,45                | 8,80           | 10,4 | 19,1  | 22,3 | 26,4 | 31,3 | 36,9 | 39,5 |
| 0,50                | 8,53           | 10,1 | 18,7  | 21,8 | 25,9 | 30,8 | 36,4 | 38,9 |
| 0,55                | 8,28           | 9,83 | 18,3  | 21,4 | 25,5 | 30,4 | 35,9 | 38,4 |
| 0,60                | 7,03           | 9,57 | 17,9  | 21,0 | 25,1 | 30,0 | 35,4 | 37,9 |
| 0,65                | 7,80           | 9,32 | 17,3  | 20,6 | 24,7 | 29,6 | 34,9 | 37,4 |
| 0,70                | 7,56           | 9,10 | 17,1  | 20,2 | 24,4 | 29,2 | 34,5 | 37,0 |
| 0,75                | 7,34           | 8,87 | 16,8  | 19,8 | 23,9 | 28,8 | 34,1 | 36,6 |
| 0,80                | 7,12           | 8,65 | 16,5  | 19,4 | 23,6 | 28,5 | 33,7 | 36,2 |
| 0,85                | 6,92           | 8,44 | 16,2  | 19,0 | 23,2 | 28,1 | 33,3 | 35,8 |
| 0,90                | 6,74           | 8,21 | 15,9  | 18,7 | 22,9 | 27,7 | 32,9 | 35,4 |
| 0,95                | 6,56           | 8,00 | 15,6  | 18,3 | 22,5 | 27,3 | 32,6 | 35,0 |
| 1,00                | 6,38           | 7,75 | 15,3  | 18,0 | 22,1 | 26,9 | 32,2 | 34,6 |

Таблица 16.13. Вязкость смеси Ag — H<sub>2</sub> при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ag, 10<sup>-6</sup> Па·с [1]

| Молярная доля<br>Ag | Температура, К |      |      |      |
|---------------------|----------------|------|------|------|
|                     | 293            | 373  | 473  | 523  |
| 0,00                | 8,75           | 10,3 | 12,1 | 13,0 |
| 0,05                | 9,08           | 12,8 | 15,3 | 16,4 |
| 0,10                | 13,0           | 15,0 | 18,1 | 19,5 |
| 0,15                | 14,6           | 17,2 | 20,5 | 22,1 |
| 0,20                | 16,0           | 18,9 | 22,5 | 24,2 |
| 0,25                | 17,0           | 20,3 | 24,0 | 25,8 |
| 0,30                | 17,9           | 21,5 | 25,4 | 27,2 |
| 0,35                | 18,6           | 22,4 | 26,4 | 28,4 |
| 0,40                | 19,2           | 23,2 | 27,4 | 29,4 |
| 0,45                | 19,7           | 23,9 | 28,2 | 30,2 |
| 0,50                | 20,2           | 24,5 | 28,9 | 30,9 |
| 0,55                | 20,4           | 24,9 | 29,4 | 31,6 |
| 0,60                | 20,9           | 25,3 | 29,9 | 32,2 |
| 0,65                | 21,8           | 25,6 | 30,3 | 32,7 |
| 0,70                | 21,4           | 25,9 | 30,7 | 33,1 |
| 0,75                | 21,6           | 26,2 | 30,9 | 33,4 |
| 0,80                | 21,7           | 26,3 | 31,2 | 33,7 |
| 0,85                | 21,8           | 26,5 | 31,5 | 33,9 |
| 0,90                | 22,0           | 26,6 | 31,7 | 34,2 |
| 0,95                | 22,1           | 26,8 | 31,9 | 34,3 |
| 1,00                | 22,1           | 26,8 | 32,1 | 34,5 |

Таблица 16.14. Вязкость смеси CO<sub>2</sub> — H<sub>2</sub> при атмосферном давлении, различных температуре и молярной доле CO<sub>2</sub>, 10<sup>-6</sup> Па·с [1]

| Молярная доля<br>CO <sub>2</sub> | Температура, К |      |      |      |
|----------------------------------|----------------|------|------|------|
|                                  | 300            | 400  | 500  | 550  |
| 0                                | 8,9            | 10,8 | 12,6 | 13,4 |
| 0,05                             | 10,9           | 13,4 | 15,4 | 16,9 |
| 0,10                             | 12,1           | 15,0 | 17,4 | 18,7 |
| 0,15                             | 12,9           | 16,1 | 19,0 | 20,1 |
| 0,20                             | 13,6           | 16,9 | 20,0 | 21,4 |
| 0,25                             | 14,0           | 17,6 | 20,8 | 21,6 |
| 0,30                             | 14,3           | 18,1 | 21,5 | 23,4 |
| 0,35                             | 14,6           | 18,5 | 22,0 | 24,0 |

Продолжение табл. 16.14

| Молярная доля<br>CO <sub>2</sub> | Температура, К |      |      |      |
|----------------------------------|----------------|------|------|------|
|                                  | 300            | 400  | 500  | 550  |
| 0,40                             | 14,8           | 18,8 | 22,4 | 24,4 |
| 0,45                             | 14,9           | 19,0 | 22,7 | 24,7 |
| 0,50                             | 15,0           | 19,2 | 22,9 | 24,9 |
| 0,55                             | 15,0           | 19,3 | 23,1 | 25,1 |
| 0,60                             | 15,1           | 19,4 | 23,3 | 25,2 |
| 0,65                             | 15,1           | 19,4 | 23,4 | 25,3 |
| 0,70                             | 15,1           | 19,5 | 23,5 | 25,4 |
| 0,75                             | 15,0           | 19,5 | 23,6 | 25,4 |
| 0,80                             | 15,0           | 19,5 | 23,6 | 25,4 |
| 0,85                             | 15,0           | 19,5 | 23,6 | 25,5 |
| 0,90                             | 15,0           | 19,5 | 23,6 | 25,5 |
| 0,95                             | 15,0           | 19,5 | 23,6 | 25,5 |
| 1,00                             | 14,9           | 19,4 | 23,5 | 25,6 |

Таблица 16.15. Вязкость частично диссоциированного воздуха, 10<sup>-6</sup> Па·с [3]

| T, 10 <sup>3</sup> К | Давление, 10 <sup>5</sup> Па |      |      |      |
|----------------------|------------------------------|------|------|------|
|                      | 0,001                        | 1    | 10   | 100  |
| 1,5                  | 55,7                         | 55,7 | 55,7 | 55,7 |
| 1,6                  | 58,4                         | 58,4 | 58,4 | 58,4 |
| 1,7                  | 61,1                         | 61,1 | 61,1 | 61,1 |
| 1,8                  | 63,7                         | 63,7 | 63,7 | 63,7 |
| 1,9                  | 66,3                         | 66,3 | 66,3 | 66,3 |
| 2,0                  | 69,0                         | 68,9 | 68,9 | 68,9 |
| 2,1                  | 71,7                         | 71,5 | 71,5 | 71,5 |
| 2,2                  | 74,5                         | 74,0 | 74,0 | 74,0 |
| 2,3                  | 77,4                         | 76,6 | 76,6 | 76,6 |
| 2,4                  | 80,6                         | 79,2 | 79,2 | 79,2 |
| 2,5                  | 83,9                         | 81,8 | 81,7 | 81,7 |
| 2,6                  | 87,4                         | 84,4 | 84,3 | 84,3 |
| 2,7                  | 90,7                         | 87,1 | 86,9 | 86,9 |
| 2,8                  | 94,0                         | 89,8 | 89,6 | 89,5 |
| 2,9                  | 97,0                         | 92,6 | 92,2 | 92,1 |
| 3,0                  | 99,9                         | 95,5 | 94,9 | 94,7 |
| 3,1                  | 103                          | 98,4 | 97,6 | 97,3 |
| 3,2                  | 106                          | 101  | 100  | 99,9 |
| 3,3                  | 108                          | 104  | 103  | 103  |



| T, 10 <sup>3</sup> K | Давление, 10 <sup>5</sup> Па |     |     |     |
|----------------------|------------------------------|-----|-----|-----|
|                      | 0,001                        | 1   | 10  | 100 |
| 3,4                  | 111                          | 108 | 106 | 105 |
| 3,5                  | 114                          | 111 | 109 | 108 |
| 3,6                  | 116                          | 114 | 112 | 111 |
| 3,7                  | 119                          | 117 | 115 | 113 |
| 3,8                  | 122                          | 120 | 118 | 116 |
| 3,9                  | 124                          | 123 | 121 | 119 |
| 4,0                  | 127                          | 126 | 124 | 122 |
| 4,1                  | 130                          | 129 | 127 | 124 |
| 4,2                  | 132                          | 132 | 130 | 127 |
| 4,3                  | 135                          | 134 | 133 | 130 |
| 4,4                  | 138                          | 137 | 136 | 133 |
| 4,5                  | 140                          | 140 | 138 | 136 |
| 4,6                  | 143                          | 142 | 141 | 139 |
| 4,7                  | 145                          | 145 | 144 | 142 |
| 4,8                  | 147                          | 147 | 147 | 144 |
| 4,9                  | 149                          | 150 | 149 | 147 |
| 5,0                  | 151                          | 152 | 152 | 150 |
| 5,1                  | 153                          | 155 | 154 | 153 |
| 5,2                  | 155                          | 158 | 157 | 155 |
| 5,3                  | 156                          | 160 | 160 | 158 |
| 5,4                  | 158                          | 162 | 162 | 161 |
| 5,5                  | 160                          | 165 | 165 | 163 |
| 5,6                  | 161                          | 167 | 167 | 166 |
| 5,7                  | 163                          | 170 | 170 | 168 |
| 5,8                  | 165                          | 172 | 172 | 171 |
| 5,9                  | 167                          | 175 | 174 | 173 |
| 6,0                  | 169                          | 177 | 177 | 176 |

## 16.3. ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Основным источником информации о вязкости жидкостей служит эксперимент. При этом в силу чувствительности измерений к качеству обработки поверхности камеры, в которой проводится экспериментальное исследование вязкости, погрешность при измерении вязкости в жидкости несколько превышает погрешность измерения вязкости газов. В табл. 16.16—16.21 представлены значения вязкости сжиженных газов и некоторых жидкостей, жидких органических соединений, жидких металлов, сплавов, расплавов солей и оснований при различной температуре.

Таблица 16.16. Вязкость сжиженных газов и некоторых жидкостей, 10<sup>-3</sup> Па·с, при различной температуре, К (давление соответствует условиям насыщения) [1, 2, 3]

| T, K           | η       | T, K           | η      | T, K             | η     | T, K             | η     |
|----------------|---------|----------------|--------|------------------|-------|------------------|-------|
| He             |         |                |        |                  |       |                  |       |
|                |         | 31             | 0,0058 | 115              | 0,12  | 82,8             | 0,16  |
|                |         | 32             | 0,0048 | 120              | 0,11  | 90,1             | 0,15  |
| 1,28           | 0,00015 | 33             | 0,0038 | 125              | 0,10  | 99,6             | 0,12  |
| 1,30           | 0,00016 |                |        | 130              | 0,096 | 112              | 0,10  |
| 1,34           | 0,00018 | Ne             |        | 135              | 0,088 | 130              | 0,066 |
| 1,59           | 0,00023 |                |        | 140              | 0,078 | H <sub>2</sub> S |       |
| 1,76           | 0,00036 | 25             | 0,15   | 145              | 0,066 | 191              | 0,52  |
| 1,91           | 0,00068 | 26             | 0,14   | 154              | 0,026 | 193              | 0,51  |
| 2,00           | 0,00096 | 27             | 0,13   | NH <sub>3</sub>  |       | 198              | 0,49  |
| 2,09           | 0,0012  | 28             | 0,12   | 240              | 0,28  | 201              | 0,47  |
| 2,11           | 0,0013  | 29             | 0,10   | 250              | 0,25  | 206              | 0,45  |
| 2,14           | 0,0016  | 30             | 0,098  | 260              | 0,22  | 210              | 0,44  |
| 2,16           | 0,0018  | 31             | 0,091  | 270              | 0,19  | HCl              |       |
| 2,18           | 0,0023  | 32             | 0,084  | 280              | 0,17  | 161              | 0,57  |
| 2,32           | 0,0020  | 33             | 0,078  | 290              | 0,15  | 167              | 0,55  |
| 2,64           | 0,0024  | 34             | 0,072  | 300              | 0,14  | 172              | 0,51  |
| 2,93           | 0,0024  | 35             | 0,067  | 310              | 0,12  | 177              | 0,49  |
| 3,74           | 0,0028  | 36             | 0,062  | 320              | 0,11  | 183              | 0,47  |
| 3,81           | 0,0029  | 37             | 0,056  | 330              | 0,10  | 188              | 0,46  |
| 4,02           | 0,0030  | 38             | 0,052  | 340              | 0,097 | F <sub>2</sub>   |       |
| Ar             |         | 39             | 0,047  | 350              | 0,088 | 69,2             | 0,41  |
|                |         | 40             | 0,043  | 360              | 0,080 | 73,2             | 0,35  |
|                |         | 41             | 0,039  | 370              | 0,070 | 75,3             | 0,33  |
| 85             | 0,28    | 42             | 0,034  | 380              | 0,061 | 78,2             | 0,30  |
| 90             | 0,24    | 43             | 0,031  | 390              | 0,051 | 80,9             | 0,28  |
| 95             | 0,21    | 44             | 0,027  | 400              | 0,040 | 83,2             | 0,26  |
| 100            | 0,18    | N <sub>2</sub> |        | 405              | 0,025 | CO <sub>2</sub>  |       |
| 105            | 0,16    |                |        | H <sub>2</sub> O |       | 255              | 0,12  |
| 110            | 0,15    | 60             | 0,36   | 273              | 1,75  | 260              | 0,12  |
| 115            | 0,13    | 65             | 0,27   | 280              | 1,42  | 265              | 0,11  |
| 120            | 0,12    | 70             | 0,22   | 300              | 0,82  | 270              | 0,10  |
| 125            | 0,11    | 75             | 0,18   | 320              | 0,56  | 275              | 0,096 |
| 130            | 0,10    | 80             | 0,15   | 340              | 0,41  | 280              | 0,091 |
| 135            | 0,089   | 85             | 0,13   | 360              | 0,32  | 285              | 0,086 |
| 140            | 0,075   | 90             | 0,11   | 380              | 0,26  | 290              | 0,079 |
| 145            | 0,060   | 95             | 0,097  | 400              | 0,22  | 295              | 0,070 |
| 150            | 0,045   | 100            | 0,087  | 420              | 0,18  | 300              | 0,060 |
| 151            | 0,028   | 105            | 0,078  | 440              | 0,16  | 304              | 0,032 |
| H <sub>2</sub> |         | 110            | 0,071  | 460              | 0,14  | 310              | 0,022 |
| 14             | 0,026   | 115            | 0,060  | 480              | 0,13  | 330              | 0,020 |
| 15             | 0,022   | 120            | 0,048  | 500              | 0,12  | 350              | 0,020 |
| 16             | 0,020   | 125            | 0,032  | 520              | 0,11  | 400              | 0,021 |
| 17             | 0,018   | 126            | 0,019  | 540              | 0,10  | 500              | 0,025 |
| 18             | 0,016   | O <sub>2</sub> |        | 560              | 0,094 | 600              | 0,028 |
| 19             | 0,015   | 55             | 0,80   | 580              | 0,086 | HI               |       |
| 20             | 0,014   | 60             | 0,59   | 600              | 0,079 | 223              | 1,42  |
| 21             | 0,013   | 65             | 0,46   | 620              | 0,071 | 227              | 1,38  |
| 22             | 0,012   | 70             | 0,37   | 647              | 0,042 | 232              | 1,34  |
| 23             | 0,011   | 75             | 0,30   | Воздух           |       | 236              | 1,30  |
| 24             | 0,010   | 80             | 0,26   | 90,1             | 0,13  | HBr              |       |
| 25             | 0,0096  | 85             | 0,22   | 107,2            | 0,094 | 187              | 0,87  |
| 26             | 0,0088  | 90             | 0,20   | 111              | 0,090 | 191              | 0,85  |
| 27             | 0,0082  | 95             | 0,17   | 125,1            | 0,082 | 194              | 0,84  |
| 28             | 0,0076  | 100            | 0,16   | CO               |       | 199              | 0,82  |
| 29             | 0,0070  | 105            | 0,14   | 73,2             | 0,22  |                  |       |
| 30             | 0,0064  | 110            | 0,13   | 75,2             | 0,20  |                  |       |
|                |         |                |        | 77,8             | 0,19  |                  |       |

[illegible]

| $T$           | $\eta$ | $T$          | $\eta$ | $T$              | $\eta$ | $T$             | $\eta$ |
|---------------|--------|--------------|--------|------------------|--------|-----------------|--------|
| 320           | 0,64   | 193          | 0,97   | 393              | 0,18   | 340             | 0,43   |
| 340           | 0,51   | 203          | 0,79   | 413              | 0,15   | 350             | 0,39   |
| 360           | 0,42   | 213          | 0,65   | 433              | 0,125  | 360             | 0,35   |
| 380           | 0,35   | 223          | 0,55   | 453              | 0,104  | 370             | 0,32   |
| 400           | 0,29   | 233          | 0,47   | 473              | 0,086  | 380             | 0,30   |
| 420           | 0,25   | 243          | 0,41   | 493              | 0,068  | 390             | 0,28   |
| 440           | 0,21   | 253          | 0,36   | 513              | 0,048  | 400             | 0,26   |
| 460           | 0,18   | 273          | 0,33   |                  |        | 410             | 0,24   |
|               |        | 293          | 0,30   |                  |        | 420             | 0,22   |
|               |        | 303          | 0,27   |                  |        |                 |        |
|               |        | 313          | 0,24   | $C_2H_4O_2$      |        | $u30-C_8H_{18}$ |        |
| $n-C_7H_{14}$ |        | 323          | 0,22   |                  |        |                 |        |
|               |        | 333          | 0,20   |                  |        |                 |        |
|               |        | 343          | 0,166  |                  |        |                 |        |
| 300           | 0,32   | 353          | 0,140  | 303              | 0,79   | 100             | 0,232  |
| 305           | 0,31   | 373          | 0,118  | 313              | 0,69   | 110             | 0,214  |
| 310           | 0,29   |              |        | 323              | 0,62   | 120             | 0,198  |
| 320           | 0,27   |              |        | 333              | 0,55   | 130             | 0,183  |
| 330           | 0,25   |              |        | 353              | 0,45   | 140             | 0,169  |
| 340           | 0,23   | $C_6H_7$     |        | 373              | 0,38   | 150             | 0,156  |
| 350           | 0,21   |              |        | 393              | 0,32   | 160             | 0,146  |
| 360           | 0,20   |              |        | 403              | 0,30   | 170             | 0,135  |
|               |        |              |        |                  |        | 180             | 0,125  |
|               |        | 273          | 10,2   |                  |        | 190             | 0,115  |
| $n-C_6H_{12}$ |        | 283          | 6,5    |                  |        | 200             | 0,106  |
|               |        | 293          | 4,4    | $n-C_5H_{12}$    |        | 210             | 0,097  |
|               |        | 303          | 3,12   |                  |        | 220             | 0,089  |
| 280           | 0,28   | 313          | 2,30   |                  |        | 230             | 0,080  |
| 290           | 0,26   | 323          | 1,80   | 153              | 2,31   | 240             | 0,072  |
| 300           | 0,24   | 333          | 1,50   | 173              | 1,25   | 250             | 0,064  |
| 310           | 0,22   | 343          | 1,28   | 193              | 0,77   | 260             | 0,054  |
| 320           | 0,21   | 353          | 1,10   | 203              | 0,64   | 270             | 0,037  |
| 330           | 0,19   | 363          | 0,94   | 213              | 0,55   |                 |        |
| 340           | 0,18   | 373          | 0,80   | 223              | 0,47   |                 |        |
| 350           | 0,16   | 383          | 0,69   | 233              | 0,42   |                 |        |
| 360           | 0,16   | 393          | 0,59   | 243              | 0,38   |                 |        |
| 370           | 0,15   |              |        | 253              | 0,34   | $n-C_8H_{18}$   |        |
| 375           | 0,14   |              |        | 263              | 0,31   |                 |        |
|               |        | $C_6H_5NO_2$ |        | 273              | 0,28   |                 |        |
| $C_7H_{14}$   |        |              |        | 283              | 0,26   | 213             | 2,47   |
|               |        |              |        | 293              | 0,24   | 223             | 1,83   |
|               |        |              |        | 303              | 0,22   | 233             | 1,43   |
|               |        | 273          | 3,1    |                  |        | 243             | 1,16   |
| 290           | 0,76   | 283          | 2,5    |                  |        | 253             | 0,97   |
| 300           | 0,69   | 293          | 2,0    | $n-C_6H_{12}O_2$ |        | 263             | 0,83   |
| 320           | 0,56   | 303          | 1,7    |                  |        | 273             | 0,71   |
| 340           | 0,46   | 313          | 1,4    |                  |        | 283             | 0,62   |
| 360           | 0,38   | 323          | 1,2    |                  |        | 293             | 0,55   |
| 380           | 0,38   | 333          | 1,1    | 290              | 0,76   | 303             | 0,49   |
| 400           | 0,27   | 353          | 0,87   | 300              | 0,67   | 313             | 0,44   |
| 420           | 0,22   | 373          | 0,70   | 320              | 0,58   | 323             | 0,39   |
| 440           | 0,19   |              |        | 340              | 0,42   | 343             | 0,32   |
| 460           | 0,16   |              |        | 360              | 0,34   | 363             | 0,28   |
|               |        | $C_4H_8O_2$  |        |                  |        | 383             | 0,23   |
| $(C_2H_5)_2O$ |        |              |        |                  |        | 403             | 0,19   |
|               |        |              |        |                  |        | 423             | 0,16   |
|               |        | 293          | 0,48   | $n-C_{10}H_{22}$ |        | 443             | 0,14   |
|               |        | 313          | 0,38   |                  |        | 463             | 0,12   |
| 153           | 4,25   | 333          | 0,31   | 300              | 0,67   | 483             | 0,10   |
| 163           | 2,54   | 353          | 0,25   | 310              | 0,59   | 503             | 0,084  |
| 173           | 1,71   | 373          | 0,21   | 320              | 0,53   | 523             | 0,070  |
| 183           | 1,24   |              |        | 330              | 0,47   | 543             | 0,056  |
|               |        |              |        |                  |        | 563             | 0,041  |

[illegible]

| $T$              | $\eta$ | $T$              | $\eta$ | $T$              | $\eta$ | $T$      | $\eta$ |
|------------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|----------|--------|
| 363              | 0,63   | $H-C_{14}H_{30}$ |        | 393              | 0,79   | $C_7H_8$ |        |
| 373              | 0,54   |                  |        | 413              | 0,66   |          |        |
| 383              | 0,46   |                  |        | 433              | 0,55   |          |        |
| $H-C_{11}H_{24}$ |        | 283              | 2,96   | 453              | 0,46   | 295      | 0,61   |
|                  |        | 293              | 2,32   | 473              | 0,39   | 300      | 0,57   |
|                  |        | 303              | 1,89   | 493              | 0,34   | 310      | 0,51   |
|                  |        | 313              | 1,56   | 513              | 0,30   | 320      | 0,45   |
| 263              | 2,16   | 323              | 1,32   | 533              | 0,26   | 330      | 0,40   |
| 273              | 1,74   | 333              | 1,14   | 553              | 0,23   | 340      | 0,37   |
| 283              | 1,42   | 343              | 0,99   | 573              | 0,20   | 350      | 0,34   |
| 293              | 1,18   | 353              | 0,87   | $H-C_{18}H_{38}$ |        | 360      | 0,31   |
| 303              | 1,01   | 363              | 0,77   |                  |        | 370      | 0,29   |
| 313              | 0,87   | 373              | 0,68   |                  |        | 380      | 0,27   |
| 323              | 0,76   | $H-C_{15}H_{32}$ |        |                  |        | 390      | 0,25   |
| 333              | 0,67   |                  |        | 303              | 3,81   | 400      | 0,23   |
| 343              | 0,60   | 293              | 2,84   | 313              | 3,06   | 420      | 0,20   |
| 353              | 0,54   | 303              | 2,29   | 323              | 2,49   | 440      | 0,18   |
| 363              | 0,48   | 313              | 1,87   | 333              | 2,06   | 460      | 0,15   |
| 373              | 0,44   | 323              | 1,57   | 343              | 1,75   | 480      | 0,13   |
| 393              | 0,36   | 333              | 1,34   | 353              | 1,48   | 500      | 0,12   |
| 413              | 0,31   | 343              | 1,16   | 363              | 1,30   | 520      | 0,10   |
| 433              | 0,27   | 353              | 1,01   | 373              | 1,13   | 540      | 0,089  |
| 453              | 0,23   | 363              | 0,89   | $C_{20}H_{42}$   |        | 550      | 0,083  |
| 473              | 0,20   | 373              | 0,79   |                  |        |          |        |
| $H-C_{12}H_{26}$ |        | $H-C_{16}H_{34}$ |        | 313              | 4,07   |          |        |
|                  |        |                  |        | 323              | 3,26   |          |        |
| 263              | 2,90   | 293              | 3,45   | 333              | 2,66   |          |        |
| 273              | 2,26   | 303              | 2,75   | 343              | 2,22   |          |        |
| 283              | 1,83   | 313              | 2,32   | 353              | 1,19   |          |        |
| 293              | 1,49   | 323              | 1,85   | 363              | 1,16   |          |        |
| 303              | 1,25   | 333              | 1,56   | 373              | 1,14   |          |        |
| 313              | 1,06   | 343              | 1,34   | 393              | 1,09   |          |        |
| 323              | 0,92   | 353              | 1,16   | 413              | 0,88   |          |        |
| 333              | 0,80   | 363              | 1,01   | 433              | 0,72   |          |        |
| 343              | 0,71   | 373              | 0,89   | 453              | 0,60   |          |        |
| 353              | 0,63   | 393              | 0,72   | 373              | 0,50   |          |        |
| 363              | 0,57   | 413              | 0,58   | 493              | 0,43   |          |        |
| 373              | 0,51   | 433              | 0,49   |                  |        |          |        |
| $H-C_{13}H_{28}$ |        | 453              | 0,41   | $C_6H_{10}$      |        |          |        |
|                  |        | 473              | 0,35   |                  |        |          |        |
| 273              | 2,96   | 493              | 0,30   | 273              | 0,56   |          |        |
| 283              | 2,34   | 513              | 0,26   | 283              | 0,49   |          |        |
| 293              | 1,88   | $H-C_{17}H_{36}$ |        | 293              | 0,44   |          |        |
| 303              | 1,56   |                  |        | 303              | 0,39   |          |        |
| 313              | 1,31   |                  |        | 313              | 0,35   |          |        |
| 323              | 1,11   |                  |        |                  |        |          |        |
| 333              | 0,97   | 303              | 3,29   | $H-C_5H_{10}O_2$ |        |          |        |
| 343              | 0,85   | 313              | 2,65   |                  |        |          |        |
| 353              | 0,75   | 323              | 2,17   | 290              | 0,58   |          |        |
| 363              | 0,67   | 333              | 1,83   | 300              | 0,53   |          |        |
| 373              | 0,60   | 343              | 1,56   | 320              | 0,42   |          |        |
| 393              | 0,49   | 353              | 1,34   | 340              | 0,34   |          |        |
| 413              | 0,41   | 363              | 1,16   | 360              | 0,27   |          |        |
| 433              | 0,35   | 373              | 1,01   |                  |        |          |        |
| 453              | 0,30   |                  |        |                  |        |          |        |
| 473              | 0,26   |                  |        |                  |        |          |        |

Таблица 16.18. Вязкость жидких металлов,  $10^{-3}$  Па·с [3]

| T, K | Li   | Na   | K     | Rb   | Cs   | Hg   | Bi  | Pb  | Sn   | Zn  | Sb  |
|------|------|------|-------|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 300  | —    | —    | —     | —    | —    | 1,6  | —   | —   | —    | —   | —   |
| 400  | —    | 0,61 | 0,41  | 0,44 | 0,42 | 1,2  | —   | —   | —    | —   | —   |
| 500  | 0,53 | 0,42 | 0,30  | 0,32 | 0,32 | 1,0  | —   | —   | 1,9  | —   | —   |
| 600  | 0,43 | 0,33 | 0,24  | 0,26 | 0,25 | 0,91 | 1,7 | 2,6 | 1,6  | —   | —   |
| 700  | 0,36 | 0,27 | 0,20  | 0,22 | 0,22 | 0,84 | 1,2 | 1,3 | 1,3  | 3,3 | —   |
| 800  | 0,31 | 0,23 | 0,17  | 0,19 | 0,19 | 0,79 | —   | 1,8 | 1,2  | 2,6 | —   |
| 900  | 0,28 | 0,20 | 0,15  | 0,17 | 0,17 | 0,76 | 1,0 | 1,5 | 1,0  | 2,1 | 1,6 |
| 1000 | 0,25 | 0,18 | 0,14  | 0,15 | 0,15 | 0,73 | —   | 1,3 | 0,93 | 1,8 | 1,2 |
| 1100 | 0,22 | 0,16 | 0,12  | 0,14 | 0,14 | 0,71 | —   | 1,2 | —    | —   | 1,1 |
| 1200 | 0,21 | 0,15 | 0,11  | 0,13 | 0,13 | —    | —   | —   | —    | —   | —   |
| 1300 | 0,19 | 0,14 | 0,10  | 0,12 | 0,12 | —    | —   | —   | —    | —   | —   |
| 1400 | 0,18 | 0,13 | 0,098 | 0,11 | 0,12 | —    | —   | —   | —    | —   | —   |
| 1500 | 0,17 | 0,12 | 0,093 | 0,11 | —    | —    | —   | —   | —    | —   | —   |
| 1600 | 0,16 | 0,12 | 0,088 | —    | —    | —    | —   | —   | —    | —   | —   |
| 1700 | 0,15 | 0,11 | 0,083 | —    | —    | —    | —   | —   | —    | —   | —   |
| 1800 | 0,14 | 0,11 | 0,079 | —    | —    | —    | —   | —   | —    | —   | —   |

Таблица 16.19. Вязкость расплавов некоторых солей и оснований,  $10^{-3}$  Па·с [5]

| T, K              | $\eta$ | T, K                                          | $\eta$ | T, K             | $\eta$ | T, K                          | $\eta$      |
|-------------------|--------|-----------------------------------------------|--------|------------------|--------|-------------------------------|-------------|
| AgBr              |        | HgBr <sub>2</sub>                             |        | KNO <sub>3</sub> |        | LiNO <sub>3</sub>             |             |
| 882               | 1,86   | 520                                           | 3,0    | 620              | 2,73   | 530                           | 6,48        |
| 922               | 1,66   | 530                                           | 2,0    | 630              | 2,58   | 560                           | 5,48        |
| 961               | 1,49   | KBr                                           |        | 650              | 2,31   | 580                           | 4,70        |
| 1043              | 1,22   |                                               |        | 670              | 2,09   | 600                           | 4,32        |
| 1076              | 1,19   |                                               |        | 690              | 1,90   | 630                           | 3,63        |
| AgCl              |        | 1020                                          | 1,5    | 710              | 1,74   | 660                           | 2,49        |
| 876               | 1,61   | 1050                                          | 1,3    | 730              | 1,60   | 700                           | 2,05        |
| 905               | 1,47   | 1080                                          | 1,2    | 750              | 1,48   | MgCl <sub>2</sub>             | 1080   4,12 |
| 942               | 1,37   | KCl                                           |        | 770              | 1,38   |                               |             |
| 1007              | 1,19   | 1060                                          | 1,4    | 790              | 1,30   |                               |             |
| AgI               |        | 1110                                          | 1,2    | 810              | 1,24   | N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |             |
|                   |        | 1200                                          | 1,0    | 820              | 1,21   |                               |             |
|                   |        | 1310                                          | 0,71   | KOH              |        |                               |             |
| 878               | 3,03   | K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> |        | 670              | 2,3    | 278                           | 1,21        |
| 900               | 2,75   | 670                                           | 13,2   | 720              | 1,7    | 283                           | 1,12        |
| 970               | 2,38   | 690                                           | 11,7   | 770              | 1,3    | 288                           | 1,04        |
| 1000              | 2,12   | 710                                           | 10,4   | 820              | 1,0    | 293                           | 0,97        |
| 1100              | 1,56   | 730                                           | 9,2    | 870              | 0,8    | 298                           | 0,91        |
| CaCl <sub>2</sub> |        | 750                                           | 8,1    |                  |        |                               |             |
| 1070              | 4,94   | 770                                           | 7,0    |                  |        |                               |             |

Продолжение табл. 16.19

| T, K                             | $\eta$ | T, K                                                          | $\eta$ | T, K              | $\eta$ | T, K              | $\eta$ |
|----------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|
| N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>    |        | 1120                                                          | 1,28   | 1020              | 440    | 850               | 3,28   |
| 274                              | 0,52   | 1150                                                          | 1,14   | 1070              | 300    | 870               | 3,06   |
| 278                              | 0,49   | 1170                                                          | 1,02   | 1120              | 210    | 880               | 2,95   |
| 282                              | 0,47   | 1200                                                          | 0,91   | PbBr <sub>2</sub> |        | SnCl <sub>4</sub> |        |
| 288                              | 0,44   | 1220                                                          | 0,82   |                   |        |                   |        |
| Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> |        | 1250                                                          | 0,75   |                   |        |                   |        |
| 1270   2,8                       |        | 1270                                                          | 0,70   | PbCl <sub>2</sub> |        |                   |        |
|                                  |        | NaNO <sub>3</sub>                                             |        |                   |        |                   |        |
| NaBr                             |        | 710                                                           | 1,62   | 650               | 10,2   | 303               | 0,81   |
|                                  |        | 730                                                           | 1,52   | 670               | 8,06   | 313               | 0,72   |
| 1035   1,42<br>1053   1,28       |        | NaOH                                                          |        | 690               | 7,0    | 323               | 0,67   |
|                                  |        |                                                               |        | 710               | 6,1    |                   |        |
| NaCl                             |        | 620   4,0<br>670   2,8<br>720   2,8<br>770   1,8<br>820   1,5 |        | 730               | 5,4    |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        | 750               | 4,7    |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        | 770               | 4,1    |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        | PbCl <sub>2</sub> |        |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        |                   |        |                   |        |
| NaPO <sub>3</sub>                |        | 770   5,53<br>790   4,66<br>810   4,02<br>830   3,59          |        |                   |        |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        |                   |        |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        |                   |        |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        |                   |        |                   |        |
|                                  |        |                                                               |        |                   |        |                   |        |

Таблица 16.20. Вязкость жидкого сплава свинец — олово при различных значениях температуры и молярной доли свинца,  $10^{-3}$  [1]

| T, K | Молярная доля Pb |       |       |       |       |
|------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|      | 0,000            | 0,025 | 0,300 | 0,382 | 1,000 |
| 460  | —                | —     | —     | 4,2   | —     |
| 470  | —                | —     | 5,0   | —     | —     |
| 475  | —                | —     | —     | 2,6   | —     |
| 480  | —                | —     | 3,0   | 2,1   | —     |
| 500  | —                | —     | 2,5   | 2,1   | —     |
| 505  | 2,6              | —     | —     | —     | —     |
| 510  | 2,0              | 4,2   | —     | —     | —     |
| 520  | —                | 1,9   | —     | —     | —     |
| 525  | —                | —     | 2,2   | 2,0   | —     |
| 540  | 1,8              | 1,8   | —     | —     | —     |
| 550  | —                | —     | 2,2   | 2,2   | —     |
| 560  | 1,7              | 1,6   | —     | —     | —     |
| 575  | —                | —     | 2,1   | 2,3   | —     |

| T, K  | Молярная доля Pb |       |       |       |       |
|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|       | 0,000            | 0,025 | 0,300 | 0,382 | 1,000 |
| 580   | 1,6              | 1,6   | —     | —     | —     |
| 600   | 1,6              | 1,5   | 2,0   | 2,3   | 3,0   |
| 612,5 | —                | —     | —     | —     | 2,8   |
| 620   | 1,5              | 1,5   | —     | —     | —     |
| 625   | —                | —     | 2,0   | 2,3   | 2,6   |
| 637,5 | —                | —     | —     | —     | 2,5   |
| 640   | 1,5              | 1,5   | —     | —     | —     |
| 650   | —                | —     | 2,0   | 2,3   | 2,4   |
| 660   | 1,5              | 1,4   | —     | —     | —     |
| 675   | —                | —     | 1,9   | 2,2   | 2,2   |
| 700   | —                | —     | 1,8   | 2,2   | 2,2   |
| 725   | —                | —     | 1,8   | —     | 2,0   |
| 750   | —                | —     | —     | —     | 1,9   |
| 775   | —                | —     | —     | —     | 1,9   |

Таблица 16.21. Вязкость жидкого сплава железо—углерод при различных значениях температуры и молярной доли железа,  $10^{-3}$  Па·с [1]

| T, K | Молярная доля железа |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | 0,9514               | 0,9580 | 0,9715 | 0,9790 | 0,9870 | 0,9936 | 0,9960 | 0,9975 | 0,9992 |
| 1550 | —                    | 8,5    | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1575 | —                    | 8,0    | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1600 | —                    | 7,5    | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1625 | —                    | 7,0    | 9,2    | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1650 | 3,8                  | 6,6    | 8,5    | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1675 | 3,3                  | 6,1    | 7,9    | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1700 | 2,9                  | 5,7    | 7,2    | 7,2    | —      | —      | —      | —      | —      |
| 1725 | 2,5                  | 5,2    | 6,6    | 6,8    | 7,7    | —      | —      | —      | —      |
| 1750 | 2,2                  | 4,7    | 6,0    | 6,4    | 7,0    | —      | —      | —      | —      |
| 1775 | —                    | —      | 5,5    | 6,4    | 6,4    | —      | —      | —      | —      |
| 1800 | —                    | 3,9    | 5,1    | 5,6    | 5,8    | —      | —      | 4,9    | 7,6    |
| 1825 | —                    | 3,5    | 4,7    | 5,2    | 5,2    | —      | 5,7    | 4,4    | 6,4    |
| 1850 | —                    | 3,2    | 4,4    | 4,9    | 4,8    | 4,7    | 4,9    | 4,1    | 5,7    |
| 1875 | —                    | —      | 4,1    | 4,6    | 4,4    | 4,2    | 4,3    | 3,9    | 5,2    |
| 1900 | —                    | —      | 3,9    | —      | 4,1    | 3,9    | 3,9    | 3,8    | 4,9    |
| 1925 | —                    | —      | —      | —      | 3,9    | 3,7    | 3,6    | 3,6    | 4,6    |
| 1950 | —                    | —      | —      | —      | 3,7    | 3,6    | 3,4    | 3,4    | —      |
| 1975 | —                    | —      | —      | —      | 3,5    | 3,4    | 3,3    | —      | —      |
| 2000 | —                    | —      | —      | —      | —      | 3,3    | —      | —      | —      |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toutoukian Y. S. e. a. Viscosity. N. Y.: NBS Edition, 1974.
2. Stephan K., Lucas K. Viscosity of dense fluids. N. Y., Lond.: Academ. Press. 1979.

3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1972.
4. Голубев И. Ф., Гнездилов Н. Е. Вязкость газовых смесей. М.: Изд-во стандартов, 1971.
5. Справочник химика. М.—Л.: Химия, 1966.

# ГЛАВА 17 ДИФФУЗИЯ

А. В. Елецкий

## 17.1. ВВЕДЕНИЕ

Диффузия — процесс выравнивания концентрации частиц (атомов, молекул, ионов, электронов) в среде. При наличии градиента концентрации  $\nabla N$  частиц в веществе возникает поток этих частиц  $j$ , выравнивающий их концентрации. Связь между потоком и коэффициентом диффузии  $D$  выражается законом Фика

$$j = -D\nabla N. \quad (17.1)$$

Это соотношение справедливо, когда размер системы в направлении градиента много больше длины свободного пробега частиц в среде, а изменение концентрации на расстоянии длины свободного пробега много меньше характерного значения концентрации частиц  $N$ . Кроме того, предполагается отсутствие внешних полей, градиентов температуры и давления.

## 17.2. ДИФФУЗИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ В ГАЗАХ

В идеальных газах, где плотность нейтральных частиц (атомов, молекул)  $N$  удовлетворяет условию

$$N \ll 1/a_0^3 \quad (17.2)$$

( $a_0 \approx 10^{-8} \div 10^{-7}$  см — характерный радиус действия межмолекулярных сил), диффузия определяется парными соударениями пробной частицы с атомами или молекулами. Поэтому вплоть до очень высоких давлений \* коэффициент диффузии обратно пропорционален плотности частиц газа и выражается через характеристику парного соударения пробной частицы и частицы газа — диффузионное сечение рассеяния  $\sigma^*$ .

Согласно элементарной кинетической теории газов выражение для коэффициента диффузии малой примеси в газе, состоящем из одного сорта частиц, а также для коэффициента самодиффузии имеет вид

$$D = \langle v \rangle \lambda / 3, \quad (17.3)$$

\* Область давлений, где указанная зависимость выполняется с достаточно высокой точностью (погрешность 2—5%), зависит от температуры. Вблизи критической точки эта зависимость может существенно нарушаться.

где  $v = \sqrt{2kT/\mu}$  — средняя относительная скорость соударения частиц примеси и частиц газа;  $\mu$  — приведенная масса сталкивающихся частиц;  $T$  — температура газа;  $\lambda = 1/N\sigma^*$  — длина пробега пробных частиц в газе;  $N$  — плотность частиц газа. Соотношение (17.3) является точным, если  $\sigma^*$  не зависит от энергии сталкивающихся частиц. В противном случае понятие длины пробега теряет определенность и указанное соотношение справедливо для эффективных величин. Принято приводить значения коэффициента диффузии не при постоянной плотности газа, а при постоянном давлении. В этом случае с учетом уравнения газового состояния  $p = NkT$  получаем зависимость

$$D = D_0 (T/273)^{1.5},$$

где  $D_0$  — коэффициент диффузии в нормальных условиях. Это соотношение справедливо при тех же условиях, что и соотношение (17.3).

Таблица 17.1. Параметры зависимости (17.4) [1]

| Газ             | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $\alpha$ | Температурный интервал, К | Газ                    | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с |
|-----------------|----------------------------|----------|---------------------------|------------------------|----------------------------|
| He              | 1,62                       | 1,71     | 14—296                    | H <sub>2</sub>         | 1,28                       |
| Ne              | 0,452                      | —        | —                         | CO                     | 0,175                      |
| Ar              | 0,156                      | 1,92     | 77—353                    | HCl                    | 0,125                      |
| Kr              | 0,08                       | —        | —                         | HBr                    | 0,079                      |
| Xe              | 0,048                      | —        | —                         | CO <sub>2</sub>        | 0,097                      |
| N <sub>2</sub>  | 0,17                       | 1,9      | 77—353                    | CH <sub>4</sub>        | 0,206                      |
| O <sub>2</sub>  | 0,18                       | 1,92     | 77—353                    | H <sub>2</sub> O (пар) | 0,277                      |
| UF <sub>6</sub> | 0,0165                     | 1,6      | 144—296                   |                        |                            |

Коэффициент самодиффузии газов. В табл. 17.1 представлены значения коэффициентов самодиффузии  $D_0$  при нормальных условиях ( $T=273$  К,  $p=0,1$  МПа). Дан интервал температур, внутри которого коэффициент диффузии можно аппроксимировать степенной функцией

$$D(T) = D_0 (T/273)^\alpha; \quad (17.4)$$

приведены значения параметра  $\alpha$ .

Таблица 17.2. Коэффициент самодиффузии газов при высоких температурах, см<sup>2</sup>/с (давление атмосферное; теоретические данные получены с использованием потенциала межатомного взаимодействия, восстановленного из экспериментов по рассеянию атомных пучков) [1]

| Газ            | Температура, 10 <sup>3</sup> K |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | 1                              | 1,5  | 2    | 2,5  | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    | 5,5  | 6    | 6,7  | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| He             | 13,3                           | 26,9 | 46,7 | 70,3 | 98,6 | 130  | 167  | 207  | 250  | 299  | 350  | 407  | 467  | 595  | 738  | 898  | 1070 | 1260 | 1460 | 1670 | 1840 |
| Ne             | 3,9                            | 7,76 | 12,7 | 18,5 | 25,2 | 32,6 | 41,1 | 50,4 | 60,7 | 72,0 | 83,8 | 96,5 | 110  | 139  | 172  | 207  | 244  | 284  | 325  | 318  | 414  |
| Ar             | 1,51                           | 3,0  | 5,03 | 7,50 | 10,4 | 13,9 | 17,8 | 22,1 | 26,8 | 31,9 | 37,4 | 43,3 | 49,5 | 62,8 | 77,4 | 93,2 | 111  | 129  | 148  | 169  | 190  |
| Kr             | 0,85                           | 1,72 | 2,83 | 4,14 | 5,7  | 7,4  | 9,3  | 11,4 | 13,8 | 16,4 | 19,2 | 22,2 | 25,5 | 32,6 | 40,7 | 49,6 | 59,6 | 70,2 | 81,5 | 93,7 | 107  |
| Xe             | 0,50                           | 1,01 | 1,65 | 2,43 | 3,32 | 4,32 | 5,42 | 6,6  | 8,0  | 9,4  | 10,9 | 12,6 | 14,4 | 18,2 | 22,5 | 27,2 | 32,4 | 37,7 | 43,4 | 49,4 | 55,7 |
| N <sub>2</sub> | 1,56                           | 3,08 | 5,05 | 7,5  | 10,4 | 13,8 | 17,6 | 21,9 | 26,6 | 31,8 | 37,3 | 43,2 | 49,6 | 62   | 79   | 96   | 113  | 133  | 153  | 174  | 197  |

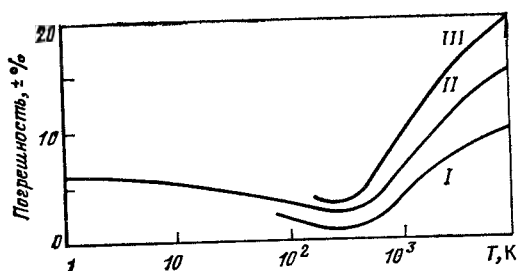


Рис. 17.1. Погрешность данных, представленных в табл. 17.3, в зависимости от температуры

В табл. 17.2 приведены значения коэффициента самодиффузии газов при высоких температурах

**Коэффициент взаимной диффузии в газах.** В двухкомпонентной смеси газов при отсутствии внешних полей, химических реакций, а также градиентов температуры и давления потоки  $j_1$  и  $j_2$  частиц первого и второго сортов выражаются соотношениями

$$\begin{aligned} j_1 &= nD_{12} \text{grad } x_1; \\ j_2 &= -nD_{21} \text{grad } x_2, \end{aligned} \quad (17.5)$$

где  $n$  — полная плотность частиц;  $x_1$  и  $x_2$  — относительная концентрация частиц первого и второго сорта. Эти соотношения справедливы в системе отсчета, в которой отсутствует результирующий поток частиц ( $j_1 + j_2 = 0$ ), поскольку, кроме того,  $x_1 + x_2 = 1$ ,  $D_{12} = D_{21}$ .

Коэффициент диффузии  $D_{AB}$  частиц произвольного сорта в смеси двух газов  $A$  и  $B$  определяется соотношением (закон Бланка), справедливым с погрешностью до нескольких процентов:

$$D_{AB}^{-1} = x_A/D_{1A} + x_B/D_{1B}, \quad (17.6)$$

где  $D_{1A}$  и  $D_{1B}$  — коэффициент взаимной диффузии пробной частицы в газах  $A$  и  $B$  при давлении, равном суммарному давлению в рассматриваемой смеси.

Основным источником информации о коэффициенте взаимной диффузии в газах является эксперимент. Точность, с которой известны значения этого коэффициента, существенно зависит от интервала температур, а также от сорта исследуемых газов. Представленные ниже результаты измерений коэффициентов взаимной диффузии различных пар газов разделены на четыре группы в зависимости от класса точности (табл. 17.3, 17.4). Погрешность, характеризующая значения коэффициентов взаимной диффузии первых трех групп (I, II, III), видна из рис. 17.1, а для четвертой группы соответствующие сведения представлены в табл. 17.4.

В табл. 17.5 и 17.6 приводятся параметры, входящие в эмпирические зависимости коэффициентов взаимной диффузии при атмосферном давлении. Для систем, представленных в табл. 17.5, эта зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp(-S/T - S'/T^2), \quad (17.7)$$

где  $S$ ,  $S'$  — эмпирические параметры, а экспоненциальный множитель без потери точности может быть опущен для температур выше 200 К.

Для систем, представленных в табл. 17.6, эмпирическая зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp(-S/T), \quad (17.8)$$

причем экспоненциальный множитель можно заменить единицей при  $T > 20 S$ .

В табл. 17.7, 17.8 приведены значения коэффициента диффузии метастабильных атомов в инертных газах.

### 17.3. ДИФфуЗИЯ В ЖИДКОСТЯХ

**Диффузия больших молекул в растворителе.** Диффузия в жидкостях обусловлена процессами многочастичного взаимодействия пробной частицы с частицами жидкости. Поэтому теоретическое определение коэффициентов диффузии в жидкостях весьма затруднено и практически единственным источником надежной информации является эксперимент. Исключение составляет случай диффузии больших молекул в растворителе с низкой молекулярной массой, для описания которого применима формула Эйнштейна—Стокса

$$D_{12} = kT/6\pi r\eta, \quad (17.9)$$

где  $r$  — радиус большой молекулы, форма которой аппроксимируется сферой;  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости. В соотношении (17.9), которое справедливо для многих систем, величина  $r$  остается неопределенным параметром, который обычно известен с точностью до множителя 2.

**Диффузия в растворах.** Коэффициенты диффузии для многих слабых растворов хорошо аппроксимируются следующим эмпирическим выражением [5]:

$$D_{12} = K_1 K_2, \quad (17.10)$$

где  $K_1$  — коэффициент, не зависящий от свойств растворителя, а  $K_2$  — коэффициент, не зависящий от свойств растворенного вещества. Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  зависят от температуры, однако если известно значение  $D_{12}$  при температуре  $T_1$ , то величина  $D_{12}(T_2)$  может быть определена на основании следующего соотношения:

$$D_{12}(T_2) = D_{12}(T_1) \frac{T_2}{T_1} \frac{\eta_2(T_1)}{\eta_2(T_2)}, \quad (17.11)$$

где  $\eta_2(T_2)$ ,  $\eta_2(T_1)$  — динамическая вязкость растворителя при температурах  $T_2$  и  $T_1$  соответственно. Погрешность, характеризующая соотношения (17.10) и (17.11), составляет десятки процентов. Подобная погрешность вообще характеризует имеющуюся информацию о коэффициентах диффузии в жидкостях. Значения  $K_1$  и  $K_2$  представлены в табл. 17.9 и 17.10.

Коэффициент диффузии в сильно разбавленном растворе электролита выражается соотношением

$$D_{12} = \frac{RT(1/n^+ + 1/n^-)}{[1/\lambda_0^+ + 1/\lambda_0^-] F}, \quad (17.12)$$

где  $R = 8,314$  Дж/(К·моль) — газовая постоянная;  $T$  — температура;  $\lambda_0^+$ ,  $\lambda_0^-$  — проводимость раствора по положительным и отрицательным ионам в пределе нулевых концентраций,  $A \cdot g \equiv \text{экв}/(\text{см}^2 \cdot \text{В})$ ;  $n^+$ ,  $n^-$  — валентности катиона и аниона соответственно;  $F = 96485$  Кл/моль — число Фарадея. Значения ионной проводимости  $\lambda_0^\pm$  некоторых водных растворов приведены в табл. 17.11. Значения коэффициента диффузии некоторых веществ, растворенных в воде, приведены в табл. 17.12 и 17.13. Следует отметить, что в жидкостях, где существенную роль в процессе диффузии играет многочастичное взаимодействие, неприменимы соотношения взаимности, т. е.  $D_{12} \neq D_{21}$ .

В табл. 17.14—17.20 приведены значения коэффициента диффузии в различных жидкостях и расплавах.

Таблица 17.3. Погрешность значения коэффициента диффузии для систем трех групп, %

| Группа точности | Система                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Температура, К |    |     |     |                 |                 |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----|-----|-----|-----------------|-----------------|
|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1,75           | 65 | 300 | 500 | 10 <sup>3</sup> | 10 <sup>4</sup> |
| I               | He—Ne, He—Ar, He—Kr, He—Xe; Ne—Ar, Ne—Kr, Ne—Xe, Ar—Kr, Ar—Xe, Kr—Xe, H <sub>2</sub> —N <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | —              | 2  | 1   | 2   | 5               | 10              |
| II              | <sup>3</sup> He— <sup>4</sup> He, He—H <sub>2</sub> , He—N <sub>2</sub> , He—CO, He—O <sub>2</sub> , He—воздух, He—CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> —Ne, H <sub>2</sub> —Ar, H <sub>2</sub> —Kr, H <sub>2</sub> —D <sub>2</sub> , CO—воздух, CO—CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> —Ar, N <sub>2</sub> —CO, N <sub>2</sub> —CO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 6              | 4  | 2   | 3   | 7               | 15              |
| III             | Ar—CH <sub>4</sub> , Ar—CO, Ar—CO <sub>2</sub> , Ar—воздух, Ar—SF <sub>6</sub> , H <sub>2</sub> —Xe, H <sub>2</sub> —CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> —O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> —SF <sub>6</sub> , CH <sub>4</sub> —He, CH <sub>4</sub> —N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> —O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> —воздух, CH <sub>4</sub> —SF <sub>6</sub> , N <sub>2</sub> —Ne, N <sub>2</sub> —Kr, N <sub>2</sub> —Xe, N <sub>2</sub> —CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> —O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> —SF <sub>6</sub> , O <sub>2</sub> —Ar, O <sub>2</sub> —CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> —SF <sub>6</sub> , CO <sub>2</sub> —воздух, CO <sub>2</sub> —N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> —SF <sub>6</sub> , SF <sub>6</sub> —He, SF <sub>6</sub> —воздух, CO—Kr, CO—O <sub>2</sub> , CO—воздух, CO—CO <sub>2</sub> , CO—SF <sub>6</sub> | —              | —  | 3   | 4   | 10              | 20              |

Таблица 17.4. Погрешность значений коэффициентов взаимной диффузии для систем IV группы

| Система                                        | Интервал температур, К | Погрешность, % |
|------------------------------------------------|------------------------|----------------|
| H <sub>2</sub> O—N <sub>2</sub>                | 282—373                | 4              |
| H <sub>2</sub> O—O <sub>2</sub>                | 282—1070               | 7              |
| H <sub>2</sub> O—воздух                        | 282—1070               | 5—10           |
| H <sub>2</sub> O—CO <sub>2</sub>               | 296—1640               | 7—10           |
| CO <sub>2</sub> —Ne                            | 195—625                | 3—5            |
| CO <sub>2</sub> —C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | 298—550                | 3—5            |
| H—H <sub>2</sub>                               | 300                    | 5              |
|                                                | 1000                   | 30             |
| H—N <sub>2</sub> ; O—N <sub>2</sub>            | 300                    | 10             |
| O—O <sub>2</sub>                               | 1000                   | 25             |
| H—He; H—Ar;                                    | 300                    | 15             |
| O—He; O—Ar                                     | 1000                   | 30             |

Таблица 17.5. Параметры выражения (17.7), действительные в температурном интервале T<sub>1</sub>—10<sup>4</sup> К [2]

| Система                          | D <sub>0</sub> , см <sup>2</sup> /с | a     | S, К   | S', К <sup>2</sup> | T <sub>1</sub> , К | Группа точности |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------|--------|--------------------|--------------------|-----------------|
| <sup>3</sup> He— <sup>4</sup> He | 1,55                                | 1,501 | —0,963 | 1,894              | 1,74               | II              |
| Ne—Ne                            | 0,235                               | 1,509 | 1,87   | —                  | 65                 | I               |
| He—Ar                            | 0,635                               | 1,552 | 1,71   | —                  | 77                 | I               |
| He—Kr                            | 0,503                               | 1,609 | —32,65 | 2036               | 77                 | I               |
| He—Xe                            | 0,391                               | 1,644 | —68,87 | 5416               | 169                | I               |
| He—H <sub>2</sub>                | 1,32                                | 1,510 | —      | —                  | 90                 | II              |
| He—N <sub>2</sub>                | 0,613                               | 1,524 | —      | —                  | 77                 | II              |
| He—CO                            | 0,613                               | 1,524 | —      | —                  | 77                 | II              |
| Ne—Ar                            | 0,278                               | 1,546 | 1,82   | 1170               | 90                 | I               |
| Ne—Kr                            | 0,242                               | 1,555 | 20,4   | —                  | 112                | I               |
| Ne—Xe                            | 0,197                               | 1,584 | 10,1   | —                  | 169                | I               |
| Ar—Kr                            | 0,14                                | 1,556 | 47,3   | —                  | 169                | I               |
| Ar—Xe                            | 0,122                               | 1,563 | 59,9   | —                  | 169                | I               |
| Ar—N <sub>2</sub>                | 0,79                                | 1,519 | 39,8   | —                  | 242                | II              |
| Kr—Xe                            | 0,0812                              | 1,608 | 52,7   | —                  | 169                | I               |
| Kr—H <sub>2</sub>                | 0,664                               | 1,564 | 26,4   | —                  | 77                 | II              |
| H <sub>2</sub> —D <sub>2</sub>   | 0,99                                | 1,500 | 6,072  | 38,10              | 14                 | II              |
| H <sub>2</sub> —N <sub>2</sub>   | 0,66                                | 1,548 | —280   | 1067               | 65                 | I               |
| H <sub>2</sub> —CO               | 0,66                                | 1,548 | —2,80  | 1077               | 65                 | II              |
| N <sub>2</sub> —CO               | 0,175                               | 1,576 | 36,2   | 3825               | 78                 | II              |

Таблица 17.6. Параметры эмпирической зависимости (17.8) [2]

| Система                          | D <sub>0</sub> , см <sup>2</sup> /с | a     | S, К  | Температурный интервал, К | Группа точности |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|---------------------------|-----------------|
| He—CH <sub>4</sub>               | 0,57                                | 1,750 | —     | 298—10 <sup>4</sup>       | III             |
| He—O <sub>2</sub>                | 0,45                                | 1,710 | —     | 244—10 <sup>4</sup>       | II              |
| He—воздух                        | 0,62                                | 1,729 | —     | 244—10 <sup>4</sup>       | II              |
| He—CO <sub>2</sub>               | 0,52                                | 1,720 | —     | 200—530                   | II              |
| He—SF <sub>6</sub>               | 0,35                                | 1,627 | —     | 290—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Ne—H <sub>2</sub>                | 0,99                                | 1,731 | —     | 90—10 <sup>4</sup>        | II              |
| Ne—N <sub>2</sub>                | 0,28                                | 1,743 | —     | 293—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Ne—CO                            | 0,22                                | 1,776 | —     | 195—625                   | III             |
| Ar—CH <sub>4</sub>               | 0,172                               | 1,785 | —     | 307—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Ar—N <sub>2</sub>                | 0,17                                | 1,752 | —     | 244—10 <sup>4</sup>       | II              |
| Ar—CO                            | 0,17                                | 1,752 | —     | 244—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Ar—O <sub>2</sub>                | 0,167                               | 1,736 | —     | 243—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Ar—воздух                        | 0,165                               | 1,749 | —     | 244—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Ar—CO <sub>2</sub>               | 0,177                               | 1,646 | 89,1  | 276—1800                  | III             |
| Ar—SF <sub>6</sub>               | 0,114                               | 1,596 | 145,4 | 328—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Kr—N <sub>2</sub>                | 0,13                                | 1,766 | —     | 248—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Kr—CO                            | 0,13                                | 1,766 | 2     | 248—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Xe—H <sub>2</sub>                | 0,54                                | 1,712 | 16,9  | 242—10 <sup>4</sup>       | III             |
| Xe—N <sub>2</sub>                | 0,106                               | 1,789 | —     | 242—10 <sup>4</sup>       | III             |
| H <sub>2</sub> —CH <sub>4</sub>  | 0,62                                | 1,765 | —     | 293—10 <sup>4</sup>       | III             |
| H <sub>2</sub> —O <sub>2</sub>   | 0,69                                | 1,732 | —     | 252—10 <sup>4</sup>       | III             |
| H <sub>2</sub> —воздух           | 0,66                                | 1,750 | —     | 252—10 <sup>4</sup>       | II              |
| H <sub>2</sub> —CO <sub>2</sub>  | 0,56                                | 1,750 | 11,7  | 200—550                   | II              |
| H <sub>2</sub> —SF <sub>6</sub>  | 0,52                                | 1,570 | 102,5 | 298—10 <sup>4</sup>       | III             |
| CH <sub>4</sub> —N <sub>2</sub>  | 0,2                                 | 1,750 | —     | 298—10 <sup>4</sup>       | III             |
| CH <sub>4</sub> —O <sub>2</sub>  | 0,22                                | 1,695 | 44,2  | 294—10 <sup>4</sup>       | III             |
| CH <sub>4</sub> —воздух          | 0,186                               | 1,747 | —     | 298—10 <sup>4</sup>       | III             |
| CH <sub>4</sub> —SF <sub>6</sub> | 0,119                               | 1,657 | 69,2  | 298—10 <sup>4</sup>       | III             |
| N <sub>2</sub> —O <sub>2</sub>   | 0,182                               | 1,724 | —     | 285—10 <sup>4</sup>       | III             |
| N <sub>2</sub> —H <sub>2</sub> O | 0,204                               | 2,072 | —     | 282—373                   | IV              |
| N <sub>2</sub> —CO <sub>2</sub>  | 0,208                               | 1,570 | 113,6 | 288—1800                  | II              |
| N <sub>2</sub> —SF <sub>6</sub>  | 0,122                               | 1,590 | 119,4 | 328—10 <sup>4</sup>       | III             |
| CO—O <sub>2</sub>                | 0,175                               | 1,724 | —     | 285—10 <sup>4</sup>       | III             |
| CO—воздух                        | 0,182                               | 1,730 | —     | 285—10 <sup>4</sup>       | III             |
| CO—CO <sub>2</sub>               | 0,142                               | 1,803 | —     | 282—473                   | III             |
| CO—SF <sub>6</sub>               | 0,129                               | 1,584 | 139,4 | 297—10 <sup>4</sup>       | III             |
| O <sub>2</sub> —H <sub>2</sub> O | 0,207                               | 2,072 | —     | 282—450                   | IV              |
| O <sub>2</sub> —H <sub>2</sub> O | 0,264                               | 1,632 | —     | 450—1070                  | IV              |
| O <sub>2</sub> —CO <sub>2</sub>  | 0,174                               | 1,661 | 61,3  | 287—1083                  | III             |
| O <sub>2</sub> —SF <sub>6</sub>  | 0,138                               | 1,522 | 129,0 | 297—10 <sup>4</sup>       | III             |



Продолжение табл. 17.6

| Система                            | $D_0$ ,<br>см <sup>2</sup> /с | $a$   | $S$ , К | Темпера-<br>турный<br>интервал,<br>К | Группа<br>точнос-<br>ти |
|------------------------------------|-------------------------------|-------|---------|--------------------------------------|-------------------------|
| H <sub>2</sub> O — воздух          | 0,205                         | 2,072 | —       | 282—450                              | IV                      |
| H <sub>2</sub> O — воздух          | 0,26                          | 1,632 | —       | 450—1070                             | IV                      |
| CO <sub>2</sub> — воздух           | 0,207                         | 1,590 | 102,1   | 280—1800                             | IV                      |
| SF <sub>6</sub> — воздух           | 0,126                         | 1,576 | 121,1   | 328—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| H <sub>2</sub> O — CO <sub>2</sub> | 0,41                          | 1,500 | 307,9   | 296—1640                             | IV                      |
| CO <sub>2</sub> — N <sub>2</sub> O | 0,095                         | 1,866 | —       | 195—550                              | III                     |
| CO <sub>2</sub> — SF <sub>6</sub>  | 0,069                         | 1,886 | —       | 328—472                              | III                     |
| H — He                             | 2,35                          | 1,732 | —       | 275—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| H — Ar                             | 0,112                         | 1,597 | —       | 275—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| H — H <sub>2</sub>                 | 0,184                         | 1,728 | —       | 190—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| N — N <sub>2</sub>                 | 0,29                          | 1,774 | —       | 280—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| O — He                             | 0,84                          | 1,749 | —       | 280—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| O — Ar                             | 0,23                          | 1,841 | —       | 280—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| O — N <sub>2</sub>                 | 0,28                          | 1,774 | —       | 280—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |
| O — O <sub>2</sub>                 | 0,28                          | 1,774 | —       | 280—10 <sup>4</sup>                  | IV                      |

Таблица 17.7. Коэффициент диффузии метастабильных атомов инертных газов в собственном газе при давлении 133 Па (1 мм рт. ст.), см<sup>2</sup>/с (погрешность данных не превышает 10 %) [3]

| Атом                                | Температура, К |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                     | 20             | 40  | 77  | 150 | 300 | 500 |
| He (2 <sup>8</sup> S)               | 60             | 100 | 160 | 260 | 460 | 710 |
| He (2 <sup>1</sup> S)               | 45             | 75  | 120 | 210 | 370 | 570 |
| Ne (3 <sup>2</sup> P <sub>2</sub> ) | 19             | 33  | 56  | —   | —   | —   |
| Ar (3 <sup>2</sup> P <sub>2</sub> ) | 8              | 13  | 20  | 34  | 64  | —   |
| Kr (3 <sup>2</sup> P <sub>2</sub> ) | —              | 12  | 12  | 20  | 38  | 51  |
| Xe (3 <sup>2</sup> P <sub>2</sub> ) | —              | —   | 8   | 13  | 22  | 33  |

Таблица 17.8. Коэффициент диффузии метастабильных атомов ртути в инертных газах при различной температуре и атмосферном давлении  $D$ , см<sup>2</sup>/с [4]

| Атом инерт-<br>ного газа | Состояние<br>атома ртути      | Температура, К |      |      |     |      |      |      |     |
|--------------------------|-------------------------------|----------------|------|------|-----|------|------|------|-----|
|                          |                               | 296            | 380  | 475  | 515 | 580  | 680  | 780  | 890 |
| He                       | 6 <sup>3</sup> P <sub>0</sub> | 0,59           | 1,1  | —    | 2,1 | —    | —    | —    | 5,8 |
|                          | 6 <sup>3</sup> P <sub>1</sub> | 0,51           | 1,0  | —    | 1,9 | —    | —    | —    | 5,3 |
| He                       | 6 <sup>3</sup> P <sub>0</sub> | 0,31           | 0,57 | 0,93 | —   | 1,4  | 1,9  | 2,4  | 2,9 |
|                          | 6 <sup>3</sup> P <sub>1</sub> | 0,27           | 0,48 | 0,86 | —   | 1,3  | 1,8  | 2,3  | 2,9 |
| Ar                       | 6 <sup>3</sup> P <sub>0</sub> | 0,16           | 0,28 | 0,46 | —   | 0,74 | 0,97 | 1,2  | 1,6 |
|                          | 6 <sup>3</sup> P <sub>1</sub> | 0,12           | 0,21 | 0,39 | —   | 0,56 | 0,80 | 1,0  | 1,4 |
| Kr                       | 6 <sup>3</sup> P <sub>0</sub> | 0,1            | 0,19 | 0,32 | —   | 0,50 | 0,65 | —    | 1,1 |
|                          | 6 <sup>3</sup> P <sub>1</sub> | 0,07           | 0,13 | 0,23 | —   | 0,35 | 0,49 | —    | —   |
| Xe                       | 6 <sup>3</sup> P <sub>0</sub> | 0,06           | 0,13 | 0,23 | —   | 0,33 | 0,45 | 0,58 | 0,7 |
|                          | 6 <sup>3</sup> P <sub>1</sub> | 0,048          | 0,10 | 0,18 | —   | 0,27 | 0,37 | 0,47 | —   |

## 17.4. ДИФФУЗИЯ В ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВАХ

формулой

$$D = D_0 \exp(-Q/RT), \quad (17.13)$$

Основным источником информации о коэффициентах диффузии в твердом теле, как и в жидкости, является эксперимент. При этом вследствие крайней чувствительности результатов измерений к степени чистоты исследуемого образца, способу его приготовления и к колебаниям температуры результаты различных измерений обычно характеризуются разбросом в пределах порядка величины. В связи с этим данные, представленные в таблицах, являются результатом усреднения по большому числу экспериментальных данных и в силу произвольного характера усреднения справедливы в лучшем случае по порядку величины.

Температурная зависимость коэффициента диффузии в твердом теле хорошо описывается полуэмпирической

где  $D_0$  — фактор диффузии;  $Q$  — энергия активации. Соотношение (17.13) выполняется в широком диапазоне температур в пределах точности измерений коэффициента диффузии. Для веществ, имеющих кристаллическую структуру, коэффициент диффузии является тензором. Приведенные ниже данные являются в основном результатом усреднения этого тензора по направлениям. В отдельных случаях приведены значения коэффициента диффузии в направлениях, параллельном ( $D_{||}$ ) и перпендикулярном ( $D_{\perp}$ ) главной оси кристалла. В табл. 17.21—17.40 представлены значения параметров, входящих в (17.13), а также интервал температур, где производились измерения.

Таблица 17.9. Значения  $K_1$  для некоторых растворенных веществ в разбавленном растворе [4]

| Растворенное вещество | T, К | $K_1, 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1/2}$ | Растворенное вещество | T, К | $K_1, 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1/2}$ |
|-----------------------|------|---------------------------------------------------|-----------------------|------|---------------------------------------------------|
| Аллиловый спирт       | 288  | 2,3                                               | Пиридин               | 293  | 2,7                                               |
| Анилин                | 288  | 2,2                                               | Пропиловый спирт      | 288  | 2,2                                               |
| Ацетон                | 288  | 3,5                                               | Пропионовая кислота   | 288  | 3,0                                               |
| Бензальдегид          | 288  | 2,4                                               | Тетрахлорметан        | 298  | 3,6                                               |
| Бензол                | 298  | 3,5                                               | Трихлорметан          | 288  | 3,3                                               |
| Бромбензол            | 288  | 2,4                                               | Толуол                | 298  | 3,0                                               |
| Бромэтан              | 288  | 4,0                                               | Уксусная кислота      | 298  | 2,3                                               |
| Бутиловый спирт       | 288  | 2,0                                               | Фенол                 | 278  | 1,9                                               |
| Вода                  | 298  | 2,6                                               | Фурфурол              | 288  | 2,2                                               |
| 1, 2-Дибромэтан       | 288  | 2,9                                               | Хлоральгидрат         | 288  | 2,0                                               |
| Диэтиловый эфир       | 288  | 3,8                                               | Хлорбензол            | 288  | 2,6                                               |
| Изоаллиловый спирт    | 288  | 2,3                                               | Этиловый спирт        | 288  | 2,5                                               |
| Иодметан              | 280  | 3,9                                               |                       |      |                                                   |
| Метиловый спирт       | 288  | 2,9                                               |                       |      |                                                   |
| Муравьиная кислота    | 279  | 4,2                                               |                       |      |                                                   |
| Нитробензол           | 288  | 2,3                                               |                       |      |                                                   |

Таблица 17.10. Значения  $K_2$  для различных растворителей [5]

| Растворитель    | T, К | $K_2, 10^{-8} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1/2}$ |
|-----------------|------|---------------------------------------------------|
| Бензол          | 288  | 5,9                                               |
| Бромбензол      | 298  | 5,1                                               |
| Вода            | 298  | 4,1                                               |
| Метиловый спирт | 288  | 6,7                                               |
| Тетрахлорметан  | 298  | 4,2                                               |
| Толуол          | 298  | 6,1                                               |
| Хлорбензол      | 298  | 5,7                                               |
| Этиловый спирт  | 298  | 3,8                                               |

Таблица 17.11. Предельные (при нулевой концентрации) значения ионной проводимости в воде при  $T = 300 \text{ К}$ , А-г-экв/(см<sup>2</sup>·В). Данные приведены к концентрации 1 г-экв/см<sup>3</sup> [6]

| Катион                       | $\lambda_0^+$ | Анион                         | $\lambda_0^-$ |
|------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| H <sup>+</sup>               | 350           | OH <sup>-</sup>               | 198           |
| Li <sup>+</sup>              | 38,7          | Cl <sup>-</sup>               | 76,3          |
| Na <sup>+</sup>              | 50,1          | Br <sup>-</sup>               | 78,3          |
| K <sup>+</sup>               | 73,5          | I <sup>-</sup>                | 76,8          |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | 73,4          | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 71,4          |
| Ag <sup>+</sup>              | 61,9          | ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | 68,0          |

Продолжение табл. 17.11

| Катион                                              | $\lambda_0^+$ | Анион                                                                        | $\lambda_0^-$ |
|-----------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Tl <sup>+</sup>                                     | 74,7          | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                                | 44,5          |
| 1/2 Mg <sup>2+</sup>                                | 53,1          | HCO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                                                | 54,6          |
| 1/2 Ca <sup>2+</sup>                                | 59,5          | CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                                 | 40,9          |
| 1/2 Sr <sup>2+</sup>                                | 50,5          | ClCH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                               | 39,8          |
| 1/2 Ba <sup>2+</sup>                                | 63,6          | CNCH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                               | 41,8          |
| 1/2 Cu <sup>2+</sup>                                | 54            | CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                 | 35,8          |
| 1/2 Zn <sup>2+</sup>                                | 53            | CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | 32,6          |
| 1/3 La <sup>3+</sup>                                | 69,5          | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                   | 32,3          |
| 1/3 CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> <sup>3+</sup> | 102           | HC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>-</sup>                                  | 40,2          |
|                                                     |               | 1/2 C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                              | 74,2          |
|                                                     |               | 1/2 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                                            | 80            |
|                                                     |               | 1/3 Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>                                        | 101           |
|                                                     |               | 1/4 Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup>                                        | 111           |

Таблица 17.12. Коэффициент диффузии неорганических веществ, растворенных в воде [1]

| Растворенное вещество | Концентрация, моль/л | T, К | $D, 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ | Растворенное вещество | Концентрация, моль/л | T, К | $D, 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ |
|-----------------------|----------------------|------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|------|------------------------------------|
| Br <sub>2</sub>       | 0,00105              | 300  | 1,25                               | CoCl <sub>2</sub>     | 0,0062               | 291  | 0,7                                |
|                       | 0,00173              | 300  | 1,24                               |                       | 0,0127               | 284  | 0,73                               |
|                       | 0,00183              | 300  | 1,24                               | CuCl <sub>2</sub>     | 1,5                  | 283  | 0,5                                |
|                       | 0,00193              | 300  | 1,23                               | CuSO <sub>4</sub>     | 0,1                  | 290  | 0,45                               |
|                       | 0,00230              | 300  | 1,22                               |                       | 0,5                  | 290  | 0,34                               |
|                       | 0,00309              | 300  | 1,20                               |                       | 0,95                 | 290  | 0,27                               |
|                       | 0,00429              | 300  | 1,19                               |                       |                      |      |                                    |
|                       | 0,00501              | 300  | 1,18                               | D <sub>2</sub> O      | 0                    | 300  | 2,5                                |
| CO <sub>2</sub>       | 0                    | 291  | 1,46                               |                       |                      |      |                                    |
| CO                    | 0                    | 300  | 2,67                               | H <sub>2</sub>        | 0                    | 291  | 3,6                                |
| CaCl <sub>2</sub>     | 0,29                 | 282  | 0,79                               | HCl                   | 0                    | 283  | 2,2                                |
|                       | 0,37                 | 282  | 1,09                               |                       | 0                    | 298  | 3,1                                |
|                       | 1,5                  | 282  | 0,84                               |                       | 0,02                 | 283  | 2,1                                |
| CdSO <sub>4</sub>     | 0                    | 290  | 0,35                               |                       | 0,02                 | 298  | 3,0                                |
|                       | 0,5                  | 290  | 0,34                               |                       | 0,05                 | 283  | 2,0                                |
|                       | 1,0                  | 290  | 0,33                               |                       | 0,05                 | 298  | 2,9                                |
|                       | 1,5                  | 290  | 0,44                               |                       | 0,2                  | 283  | 2,1                                |
|                       | 2,0                  | 290  | 0,43                               |                       | 0,2                  | 298  | 3,0                                |
|                       | 3,0                  | 290  | 0,44                               |                       | 0,35                 | 283  | 2,1                                |
|                       | 3,5                  | 290  | 0,34                               |                       | 0,35                 | 298  | 3,1                                |
|                       | 4,5                  | 290  | 0,36                               |                       | 0,43                 | 273  | 1,6                                |
|                       | 5,5                  | 290  | 0,4                                |                       | 1,0                  | 298  | 3,6                                |
|                       | 6,5                  | 290  | 0,45                               |                       | 2,0                  | 273  | 1,8                                |
|                       | 7,0                  | 290  | 0,48                               |                       | 2,0                  | 284  | 2,5                                |
| Cl <sub>2</sub>       | 0,1                  | 285  | 1,4                                |                       | 5,0                  | 273  | 2,2                                |
|                       | 0,1                  | 290  | 1,3                                |                       | 6,0                  | 284  | 3,1                                |
|                       |                      |      |                                    |                       | 8,0                  | 273  | 2,7                                |
|                       |                      |      |                                    |                       | 9,0                  | 285  | 3,4                                |

Продолжение табл. 17.12

| Растворенное вещество   | Концентрация, моль/л | T, К | $D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ | Растворенное вещество                | Концентрация, моль/л | T, К | $D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ |
|-------------------------|----------------------|------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------|------------------------------------|
| $\text{HNO}_3$          | 0,84                 | 278  | 1,7                                | LiI                                  | 4,2                  | 291  | 0,11                               |
|                         | 3,0                  | 279  | 1,8                                |                                      | 1,3                  | 283  | 0,93                               |
|                         | 3,0                  | 280  | 2,4                                |                                      |                      |      |                                    |
|                         | 20                   | 282  | 2,3                                |                                      |                      |      |                                    |
| $\text{H}_2\text{O}$    | 0                    | 293  | 0,9                                | $\text{MgSO}_4$                      | 0,5                  | 288  | 0,54                               |
| $\text{KBr}$            | 1,0                  | 283  | 1,2                                |                                      | 1,0                  | 288  | 0,53                               |
| $\text{K}_2\text{CO}_3$ | 3,0                  | 283  | 0,7                                |                                      | 3,0                  | 288  | 0,59                               |
|                         |                      |      |                                    |                                      | 4,5                  | 288  | 0,73                               |
| $\text{KCl}$            | 0,00125              | 298  | 1,96                               | $\text{N}_2$                         | 0                    | 291  | 1,63                               |
|                         | 0,00194              | 298  | 1,95                               |                                      | 0,683                | 277  | 1,23                               |
|                         | 0,00325              | 298  | 1,95                               |                                      | 3,55                 | 277  | 1,23                               |
|                         | 0,00585              | 298  | 1,94                               |                                      | 2,9                  | 283  | 1,0                                |
|                         | 0,00704              | 298  | 1,93                               | $\text{NaBr}$                        | 2,4                  | 283  | 0,45                               |
|                         | 0,00980              | 298  | 1,92                               | $\text{Na}_2\text{CO}_3$             | 0,05                 | 291  | 1,26                               |
|                         | 0,02                 | 298  | 1,91                               | $\text{NaCl}$                        | 0,40                 | 291  | 1,2                                |
|                         | 0,1                  | 298  | 1,89                               |                                      | 1,00                 | 291  | 1,24                               |
|                         | 0,5                  | 298  | 1,82                               |                                      | 2,0                  | 291  | 1,29                               |
|                         | 0                    | 282  | 1,7                                |                                      | 3,0                  | 291  | 1,36                               |
|                         | 0,05                 | 282  | 1,56                               |                                      | 4,0                  | 291  | 1,43                               |
|                         | 0,10                 | 282  | 1,54                               |                                      | 5,0                  | 291  | 1,49                               |
|                         | 0,20                 | 282  | 1,53                               | $\text{NaI}$                         | 1,0                  | 283  | 0,93                               |
|                         | 0,50                 | 282  | 1,55                               |                                      | 2,0                  | 283  | 1,04                               |
|                         | 1,00                 | 282  | 1,61                               |                                      | 0,6                  | 286  | 1,04                               |
|                         | 1,5                  | 282  | 1,67                               |                                      | 3                    | 284  | 0,88                               |
|                         | 2,00                 | 282  | 1,73                               | $\text{NaNO}_3$                      | 5                    | 284  | 0,96                               |
| $\text{KI}$             | 0,01                 | 273  | 1,3                                |                                      | 6                    | 286  | 0,90                               |
|                         | 0,01                 | 291  | 1,7                                | $\text{NO}$                          | 0                    | 289  | 1,54                               |
|                         | 0,10                 | 273  | 1,24                               | $\text{I}_2$                         | 0,05                 | 298  | 1,25                               |
|                         | 0,10                 | 291  | 1,61                               |                                      |                      |      |                                    |
|                         | 1,0                  | 273  | 1,21                               |                                      |                      |      |                                    |
|                         | 1,0                  | 291  | 1,59                               |                                      |                      |      |                                    |
|                         | 5,5                  | 273  | 1,37                               | $\text{O}_2$                         | 0                    | 298  | 2,60                               |
|                         | 5,5                  | 291  | 1,8                                |                                      |                      |      |                                    |
| $\text{KNO}_3$          | 0,05                 | 291  | 1,45                               | $\text{NaOH}$                        | 0,02                 | 285  | 1,3                                |
|                         | 0,20                 | 291  | 1,39                               |                                      | 0,1                  | 285  | 1,29                               |
|                         | 0,40                 | 291  | 1,35                               |                                      | 0,9                  | 285  | 1,21                               |
|                         | 0,80                 | 192  | 1,28                               | $\text{Na}_2\text{SO}_4$             | 3,9                  | 285  | 1,14                               |
|                         | 1,0                  | 291  | 1,24                               |                                      | 1,4                  | 283  | 0,76                               |
|                         | 2,0                  | 291  | 1,15                               | $\text{NaCH}_3\text{COO}$            | 0,2                  | 285  | 0,71                               |
|                         | 2,5                  | 291  | 1,17                               | $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$           | 0,0088               | 291  | 0,667                              |
| $\text{KOH}$            | 0,1                  | 287  | 2,0                                |                                      | 0,0226               | 291  | 0,822                              |
|                         | 0,9                  | 287  | 2,16                               |                                      | 0,068                | 291  | 0,93                               |
|                         | 3,9                  | 287  | 2,82                               |                                      |                      |      |                                    |
| $\text{K}_2\text{SO}_4$ | 0,02                 | 293  | 1,27                               | $\text{PI}(\text{NO}_3)_2$           | 0,22                 | 285  | 0,82                               |
|                         | 0,05                 | 293  | 1,12                               |                                      | 0,82                 | 285  | 0,76                               |
|                         | 0,28                 | 293  | 1,0                                |                                      |                      |      |                                    |
|                         | 0,95                 | 293  | 0,92                               |                                      |                      |      |                                    |
| $\text{LiBr}$           | 2,3                  | 283  | 0,93                               | $\text{ZnSO}_4$                      | 0,025                | 293  | 0,58                               |
|                         | 4,4                  | 283  | 1,04                               |                                      | 0,050                | 293  | 0,54                               |
|                         | 0,01                 | 282  | 0,88                               |                                      | 0,55                 | 293  | 0,12                               |
|                         | 0,01                 | 291  | 1,16                               |                                      | 2,95                 | 293  | 0,38                               |
| $\text{LiCl}$           | 1,0                  | 282  | 0,81                               | $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ | 2                    | 273  | 0,139                              |
|                         | 1,0                  | 291  | 1,06                               |                                      | 2                    | 291  | 0,243                              |
|                         | 4,2                  | 282  | 0,84                               |                                      |                      |      |                                    |
|                         |                      |      |                                    |                                      |                      |      |                                    |

Таблица 17.13. Коэффициент диффузии органических соединений в водных растворах при нулевой концентрации [7]

| Растворенное вещество | T, К | $D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ | Растворенное вещество | T, К | $D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ |
|-----------------------|------|------------------------------------|-----------------------|------|------------------------------------|
| Аллаксан              | 293  | 0,67                               | Метилциклопентан      | 275  | 0,48                               |
| Арабиноза             | 293  | 0,70                               |                       | 283  | 0,59                               |
| Ацетамид              | 293  | 1,05                               |                       | 293  | 0,85                               |
| Ацетоннитрил          | 288  | 1,26                               |                       | 333  | 1,92                               |
| Анилин                | 293  | 0,92                               | Мочевина              | 285  | 0,99                               |
| Бензол                | 275  | 0,58                               |                       | 293  | 1,20                               |
|                       | 283  | 0,75                               |                       | 298  | 1,38                               |
|                       | 293  | 1,02                               | Никотин               | 293  | 0,53                               |
| $n$ -Бутан            | 333  | 2,55                               | Пентаэритрит          | 293  | 0,69                               |
|                       | 277  | 0,50                               |                       |      |                                    |
|                       | 293  | 0,89                               | Пиридин               | 288  | 0,58                               |
|                       | 333  | 2,51                               | Пирогаллол            | 288  | 0,56                               |
| Винилхлорид           | 298  | 1,34                               | Пропилен              | 298  | 1,44                               |
|                       | 323  | 2,42                               | Рафиноза              | 293  | 0,36*3                             |
|                       | 348  | 3,67                               | Резорцин              | 293  | 0,77                               |
| Гидрохинон            | 293  | 0,78                               | Сахароза              | 285  | 0,36                               |
| Глицерин              | 288  | 0,72                               | Сероводород           | 288  | 1,43                               |
|                       | 283  | 0,63*1                             |                       |      |                                    |
| Глюкоза               | 288  | 0,52                               | Спирт:                |      |                                    |
| Диэтиламин            | 288  | 0,97                               | аллиловый             | 288  | 0,90                               |
| Кислота винная        | 288  | 0,61                               | бензиловый            | 293  | 0,82                               |
| Кислота уксусная      | 293  | 1,19                               | бутиловый             | 288  | 0,77                               |
|                       | 286  | 0,91*2                             | изоамиловый           | 288  | 0,69                               |
| Кислота бензойная     | 298  | 1,21                               | метиловый             | 288  | 1,28                               |
| Кислота щавелевая     | 293  | 1,53                               | пропиловый            | 288  | 0,87                               |
| Кофеин                | 283  | 0,42                               | этиловый              | 283  | 0,84                               |
| Лактоза               | 283  | 0,46                               |                       | 288  | 1,00                               |
| Мальтоза              | 283  | 0,328                              | Уретан                | 298  | 1,24                               |
|                       | 293  | 0,426                              | Фурфурол              | 288  | 0,87                               |
| Маннит                | 293  | 0,605                              | Этилацетат            | 293  | 0,87                               |
| Метан                 | 283  | 0,328                              | Этиленгликоль         | 0    | 1,04                               |
|                       | 293  | 0,85                               | Этилбензол            | 298  | 1,16                               |
|                       | 333  | 3,55                               |                       | 275  | 0,58                               |
|                       |      |                                    |                       | 283  | 0,75                               |
|                       |      |                                    |                       | 293  | 1,02                               |
|                       |      |                                    |                       | 333  | 2,55                               |

\*1 Концентрация 0,125 моль/л.

\*2 Концентрация 0,01 моль/л.

\*3 Концентрация 0,05 моль/л.

Таблица 17.14. Коэффициент диффузии воды в органических растворителях,  $T = 300 \text{ К}$ , молярное содержание воды  $< 1 \%$ ,  $10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$  [6]

| Растворитель     | $D$    | Растворитель          | $D$  |
|------------------|--------|-----------------------|------|
| Спирт:           |        | Этилацетат            | 3,20 |
| метиловый        | 1,75   | Анилин                | 0,70 |
| этиловый         | 1,24   | $n$ -Гексадекан       | 3,76 |
| $n$ -пропиловый  | 0,61   | $n$ -Бутилацетат      | 2,87 |
| изо-пропиловый   | 0,38   | $n$ -Масляная кислота | 0,79 |
| $n$ -бутиловый   | 0,56   | Толуол                | 6,19 |
| изо-бутиловый    | 0,30   | Дихлорметан           | 6,53 |
| бензиловый       | 0,37   | 1, 1, 1-Трихлорэтан   | 4,64 |
| Этиленгликоль    | 0,18   | Трихлорэтилен         | 8,82 |
| Триэтиленгликоль | 0,19   | Нитробензол           | 2,80 |
| Глицерин         | 0,0083 | Пиридин               | 2,73 |
| Ацетон           | 4,56   |                       |      |
| Фурфурол         | 0,90   |                       |      |

Таблица 17.15. Коэффициент диффузии различных веществ в метиловом спирте,  $T = 288 \text{ К}$ , молярная концентрация раствора 1 %,  $10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$  [7]

| Растворенное вещество | $D$  | Растворенное вещество    | $D$  |
|-----------------------|------|--------------------------|------|
| Аллиловый спирт       | 1,80 | мета-Нитробензальдегид   | 1,24 |
| Анилин                | 1,49 | Нитрофенол               | 1,38 |
| Ацетанилид            | 1,50 | Пиридин                  | 1,58 |
| Ацетилдифениламин     | 0,98 | Салол                    | 1,29 |
| Ацетонитрил           | 2,64 | 2, 4, 6-Трибромфенол     | 1,12 |
| Бензальдегид          | 1,66 | 2, 4, 6-Тринитрофенол    | 1,32 |
| Броманилин            | 1,41 | 2, 4, 6-Трихлорфенол     | 1,21 |
| Бромбензол            | 1,75 | Уретан                   | 1,41 |
| Бромнитрофенол        | 1,43 | Фенотол                  | 1,40 |
| 3-Бромпропилен        | 2,22 | Фенилацетат              | 1,62 |
| Бромфенол             | 1,34 | Фенол                    | 1,40 |
| Ванилин               | 1,00 | Фенолфталеин             | 0,78 |
| Гидрохинон            | 1,25 | Фурфурол                 | 1,70 |
| Дибензиламин          | 0,86 | Хлоралгидрат             | 1,16 |
| n-Дибромбензол        | 1,55 | Хлоранилин               | 1,34 |
| Дибромнафталин        | 1,33 | Хлорбромметан            | 2,50 |
| Диодметан             | 1,68 | 1-Хлоргидрин             | 1,30 |
| Динитробензол         | 1,56 | Хлорнитробензол          | 1,68 |
| Динитронафталин       | 1,32 | Хлороформ                | 2,07 |
| 2,4-Динитрофенол      | 1,40 | Хлорфенол                | 1,32 |
| 1,1-Динитрогидрид     | 1,36 | Четыреххлористый углерод | 1,70 |
| Дихлорнафталин        | 1,52 | Этил:                    |      |
| Изоамиловый спирт     | 1,34 | бромистый                | 2,40 |
| Иодбензол             | 1,65 | иодистый                 | 2,16 |
| Иодоформ              | 1,83 | Этилен:                  |      |
| 3-Иодпропилен         | 1,72 | бромистый                | 1,95 |
| Кислота:              |      | иодистый                 | 1,56 |
| пропионовая           | 1,35 | Этилнитрат               | 2,20 |
| дихлоруксусная        | 1,36 |                          |      |
| иодпропионовая        | 1,36 |                          |      |
| молочная              | 1,36 |                          |      |
| пропионовая           | 1,62 |                          |      |
| трибромуксусная       | 1,23 |                          |      |
| трихлоруксусная       | 1,45 |                          |      |
| фталевая              | 1,30 |                          |      |
| хлорбензойная         | 1,29 |                          |      |
| хлоруксусная          | 1,52 |                          |      |

Таблица 17.16. Коэффициент диффузии в различных жидкостях при бесконечном разбавлении. В случае раствора ненулевой концентрации последние указаны в скобках, моль/л [5, 6]

| Растворимое вещество | Растворитель | $T, \text{ К}$ | $D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ |
|----------------------|--------------|----------------|------------------------------------|
| Ацетон               | Хлороформ    | 298            | 2,35                               |
|                      |              | 313            | 2,90                               |
|                      |              | 288            | 2,51                               |
| Бензол               |              | 298            | 2,89                               |
|                      |              | 313            | 3,55                               |
|                      |              | 328            | 4,25                               |
| n-Бутилацетат        |              | 298            | 1,71                               |
| Диэтиловый эфир      |              | 288            | 2,07                               |
|                      |              | 298            | 2,14                               |
| Иод (0,05)           |              | 283            | 1,93                               |
| Метилэтилкетон       |              | 298            | 2,13                               |
| Фенол                |              | 283            | 1,60                               |
| Этилацетат           |              | 298            | 2,02                               |
| Этиловый спирт       |              | 288            | 2,20                               |

Продолжение табл. 17.16

| Растворимое вещество                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Растворитель     | $T, \text{ К}$ | $D, 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|------------------------------------|
| Анилин<br>Бензойная кислота<br>Бромбензол<br>Винилхлорид<br>Гептан                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Бензол           | 298            | 1,96                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 1,38                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 280            | 1,45                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 280            | 1,77                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 2,10                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 318            | 2,75                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 338            | 3,65                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 353            | 4,25                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 303            | 2,89                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 303            | 2,09                               |
| Кислород<br>Метилэтилкетон<br>Муравьиная кислота<br>Нафталин<br>Толуол<br>1, 2, 4-Трихлорбензол                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Ацетон           | 298            | 2,28                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 280            | 1,19                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 1,85                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 313            | 2,39                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 280            | 1,34                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 2,09                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 2,62                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 2,73                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 4,56                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 3,77                               |
| Уксусная кислота<br>Бензойная кислота<br>Бромформ<br>Вода<br>Муравьиная кислота<br>Уксусная кислота                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | n-Гексан         | 288            | 2,92                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 3,31                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 313            | 4,04                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 280            | 2,60                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 4,21                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 2,73                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 303            | 3,74                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 4,87                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 3,70                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 4,21                               |
| Бромбензол<br>n-Гексан<br>Додекан<br>Метилэтилкетон<br>Пропан<br>Тетрахлорметан<br>Толуол<br>Азобензол (0,2)<br>Аконитин (0,04)<br>Аллиловый спирт (1)<br>Амиловый спирт<br>Изоамиловый спирт<br>Ацеталь (1)<br>Ацетамид<br>Ацетонин<br>Бромнафталин (0,05)<br>Бромформ<br>Бруцин (0,06)<br>Вода<br>Гидрохинон<br>Двуокись углерода<br>Иод<br>Иодбензол<br>Камфара<br>Кислород<br>Мочевина<br>Пиридин<br>Резорцин<br>Салигенин<br>Стеариновая кислота (0,2)<br>Тетрахлорметан<br>Фенол (0,1)<br>Хлораль (1)<br>Хлороформ (1)<br>Бромбензол | Этиловый спирт   | 293            | 0,74                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,27                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,95                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,98                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,81                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 1,13                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,67                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,56                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,74                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,97                               |
| Бромбензол (0,1)<br>Иод<br>Иод (0,1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Уксусная кислота | 293            | 0,28                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 1,24                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,49                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 290            | 3,2                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 1,32                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 1,00                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,70                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 303            | 2,64                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 285            | 0,54                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 1,10                               |
| Бромбензол (0,1)<br>Иод<br>Иод (0,1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                  | 293            | 0,45                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,61                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,59                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 298            | 1,50                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,80                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 0,61                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 1,25                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 293            | 1,58                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 280            | 3,25                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 280            | 1,51                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                  | 289            | 3,60                               |

| Растворимое вещество       | Растворитель              | T, К | D, 10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с |
|----------------------------|---------------------------|------|----------------------------------------|
| Бромформ                   | Эфир этиловый             | 290  | 3,30                                   |
| Нитробензол                |                           | 281  | 3,24                                   |
| Фенол                      |                           | 292  | 3,60                                   |
| $\alpha$ -Бромнафталин     |                           | 280  | 0,149                                  |
| Адипиновая кислота         | Эфир дибензиловый         | 303  | 0,40                                   |
| Бензол                     | <i>n</i> -Бутиловый спирт | 298  | 1,0                                    |
| Винная кислота             |                           | 303  | 0,40                                   |
| Вода                       |                           | 298  | 0,56                                   |
| Дифенил                    |                           | 298  | 0,63                                   |
| <i>n</i> -Дихлорбензол     | Гептан                    | 298  | 0,82                                   |
| Масляная кислота           |                           | 303  | 0,51                                   |
| Метилсвый спирт            |                           | 303  | 0,59                                   |
| Олеиновая кислота          |                           | 303  | 0,25                                   |
| Пропан                     | Этилацетат                | 273  | 1,02                                   |
|                            |                           | 298  | 1,57                                   |
| <i>n</i> -Пропиловый спирт |                           | 303  | 0,40                                   |
| Ацетон                     |                           | 293  | 3,18                                   |
| Вода                       | Анизол                    | 298  | 3,20                                   |
| Иод (0,1)                  |                           | 293  | 2,15                                   |
| Метилэтилкетон             |                           | 303  | 2,93                                   |
| Нитробензол                |                           | 293  | 2,25                                   |
| Уксусная кислота           | Декалин                   | 293  | 2,18                                   |
| Этилбензол                 |                           | 293  | 1,85                                   |
| Бензол                     |                           | 298  | 3,40                                   |
|                            |                           | 318  | 4,40                                   |
|                            | Ссроуглсрод               | 338  | 6,05                                   |
| Иод (0,1)                  |                           | 372  | 8,40                                   |
| Иод (0,1)                  |                           | 293  | 1,13                                   |
| Бромбензол                 |                           | 280  | 0,47                                   |
| $\alpha$ -Бромнафталин     | Изоаллиловый спирт        | 280  | 0,34                                   |
| Бром                       |                           | 292  | 3,40                                   |
| Фенол                      |                           | 292  | 0,20                                   |
| Фенол                      |                           | 292  | 0,20                                   |
| Бромбензол                 | Тетралин                  | 280  | 0,48                                   |
| $\alpha$ -Бромнафталин     |                           | 280  | 0,36                                   |
| Тетрабромэтан (0,06)       |                           | 323  | 0,94                                   |
| Бромбензол                 |                           | 280  | 1,59                                   |
| Иод (0,1)                  | Тетрахлорэтан             | 293  | 1,59                                   |
| Иод (0,1)                  |                           | 293  | 1,36                                   |
| Бромбензол                 |                           | 280  | 1,44                                   |
|                            |                           | 280  | 1,44                                   |

Таблица 17.17. Коэффициент диффузии веществ в расплавленных солях [7]

| Диффундирующее вещество | Среда             | T, К | D, 10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с |
|-------------------------|-------------------|------|----------------------------------------|
| AgNO <sub>3</sub>       | KNO <sub>3</sub>  | 630  | 4,56                                   |
|                         | KNO <sub>3</sub>  | 660  | 4,86                                   |
|                         | NaNO <sub>3</sub> | 600  | 4,57                                   |
|                         | NaNO <sub>3</sub> | 630  | 5,06                                   |
| AgBr                    | KBr               | 1050 | 4,92                                   |
| AgCl                    | KCl               | 1000 | 4,63                                   |
|                         | KCl               | 1050 | 5,10                                   |

| Диффундирующее вещество           | Среда                           | T, К | D, 10 <sup>-5</sup> см <sup>2</sup> /с |
|-----------------------------------|---------------------------------|------|----------------------------------------|
| Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | KCl, LiCl                       | 750  | 5,61                                   |
|                                   | KCl, LiCl                       | 1000 | 6,61                                   |
|                                   | KNO <sub>3</sub>                | 640  | 2,06                                   |
|                                   | NaNO <sub>3</sub>               | 630  | 3,71                                   |
| KBr                               | KNO <sub>3</sub>                | 630  | 3,01                                   |
| KCl                               | KNO <sub>3</sub>                | 630  | 2,96                                   |
| PbCl <sub>2</sub>                 | KCl, LiCl                       | 800  | 2,06                                   |
| NaNO <sub>3</sub>                 | KCl, LiCl                       | 1000 | 4,40                                   |
|                                   | KNO <sub>3</sub>                | 630  | 5,22                                   |
|                                   | KNO <sub>3</sub>                | 630  | 2,81                                   |
|                                   | NaNO <sub>3</sub>               | 620  | 4,17                                   |
| TlBr                              | KBr                             | 1040 | 4,28                                   |
| TlCl                              | KCl, LiCl                       | 800  | 3,10                                   |
| TiNO <sub>3</sub>                 | KCl                             | 800  | 3,14                                   |
|                                   | KNO <sub>3</sub>                | 620  | 3,17                                   |
|                                   | Na <sub>2</sub> NO <sub>3</sub> | 630  | 4,31                                   |

Таблица 17.18. Коэффициент диффузии веществ в бензоле, 10<sup>-5</sup> см<sup>2</sup>/с (T = 288 К, молярная концентрация раствора 1 %) [5]

| Растворенное вещество  | D    | Растворенное вещество      | D    |
|------------------------|------|----------------------------|------|
| Альдегид салициловый   | 1,78 | Метилсалицилат             | 1,56 |
| Ацетилдифениламин      | 0,90 | Нафталин (1%)              | 1,19 |
| Бензальдегид           | 1,73 | Нитробензол                | 1,84 |
| Бром (0,1 М, 285 К)    | 2,00 | $\alpha$ -Нитронафталин    | 1,39 |
| Броманилин             | 1,41 | Спирт:                     |      |
| Бромбензол             | 1,86 | изоамиловый                | 1,48 |
| $\alpha$ -Бромнафталин | 1,30 | пропиловый                 | 1,60 |
| Бромнитробензол        | 1,33 | 1, 2, 4, 5-Тетрахлорбензол | 1,24 |
| Бромформ (291К)        | 1,62 | (<1%, 281 К)               |      |
| Бромфенол              | 1,34 | Тринитротолуол             | 1,39 |
| Дексахлорбензол        | 1,02 | 2, 4, 6-Тринитрофенол      | 1,39 |
| (<1%, 281 К)           |      | 1, 2, 4-Трихлорбензол      | 1,34 |
| <i>n</i> -Дибромбензол | 1,37 | (<1%, 281 К)               |      |
| Дибромнафталин         | 1,25 | 1, 2, 3-Трихлорпропан      | 1,72 |
| мети-Динитробензол     | 1,54 | Фенантрен (1%, 281 К)      | 0,95 |
| Динитронафталин        | 1,23 | Фенол (278 К)              | 1,27 |
| <i>n</i> -Дихлорбензол | 1,90 | Хинон                      | 1,68 |
| Дихлорнафталин         | 1,40 | Хлоранилин                 | 1,56 |
| Иод (0,05 М, 293К)     | 1,95 | Хлорбензол                 | 1,42 |
| Иодбензол (1%, 281 К)  | 1,35 | $\alpha$ -Хлорнафталин     | 1,20 |
| Иодоформ               | 1,38 | Хлорнитробензол            | 1,70 |
| Кислота:               |      | Хлорформ                   | 2,11 |
| бензойная              | 1,36 | Хлорфенол                  | 1,42 |
| фталевая               | 1,37 | Этилен:                    |      |
| хлоруксусная           | 1,48 | бромистый                  | 1,97 |
|                        |      | иодистый                   | 1,40 |
|                        |      | Эфир этиловый              | 2,21 |

Таблица 17.19. Коэффициент диффузии атомов металлов в амальгамах,  $10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с [7]

| Металл | T, К | D    | Металл | T, К | D    |
|--------|------|------|--------|------|------|
| Li     | 298  | 0,93 | Zn     | 298  | 2,4  |
| Na     | 298  | 0,86 | Cd     | 298  | 2,0  |
| K      | 298  | 0,71 | Sn     | 298  | 2,1  |
| Rb     | 280  | 0,53 | Bi     | 298  | 1,5  |
| Cs     | 298  | 0,64 | Pb     | 298  | 2,1  |
| Ag     | 289  | 1,11 | Ba     | 281  | 0,60 |
| Au     | 298  | 0,73 | Sr     | 283  | 0,54 |
| Tl     | 298  | 1,18 | Ca     | 283  | 0,62 |

Таблица 17.20. Коэффициент диффузии в расплавленных металлах [8]

| Диффундирующий металл | Диффузионная среда | T, К | D, $10^{-5}$ см <sup>2</sup> /с |
|-----------------------|--------------------|------|---------------------------------|
| Mg                    | Al                 | 1000 | 7,54                            |
| Au                    | Bi                 | 800  | 5,22                            |
| Si                    | Fe                 | 1750 | 2,4                             |
| Si                    | Fe                 | 1830 | 10,8                            |
| Rh                    | Pb                 | 800  | 3,52                            |
| Pt                    | Pb                 | 760  | 1,95                            |
| Ag                    | Sn                 | 800  | 4,8                             |
| Au                    | Sn                 | 800  | 5,37                            |
| Pb                    | Sn                 | 800  | 3,68                            |

Таблица 17.21. Параметры выражения (17.13) для коэффициента самодиффузии металлов [8]

| Металл | Температурный интервал, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль | Металл  | Температурный интервал, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|--------|---------------------------|----------------------------|-------------|---------|---------------------------|----------------------------|-------------|
| Ag     | 700—1200                  | 0,81                       | 191         | Cd, ⊥   | 380—490                   | 0,10                       | 80          |
| Al     | 600—700                   | 0,10                       | 128         | Cd,     | 380—490                   | 0,05                       | 76          |
|        | 700—900                   | 1,7                        | 143         | Mg, ⊥   | 740—900                   | 1,5                        | 136         |
| Au     | 900—1200                  | 0,031                      | 165         | Mg,     | 740—900                   | 1,0                        | 135         |
|        | 1100—1300                 | 0,11                       | 177         | α-Ti    | 960—1100                  | $6,4 \cdot 10^{-8}$        | 123         |
| Co     | 1050—1300                 | 0,5                        | 274         | β-Ti    | 1170—2850                 | 0,0016                     | 146         |
|        | 1300—1600                 | 0,2                        | 260         | α-Ti, ⊥ | 420—560                   | 0,4                        | 94,5        |
| Cu     | 800—1300                  | 70                         | 235         |         | 470—690                   | 0,39                       | 104         |
|        | 1000—1200                 | 120                        | 278         | α-Ti,   | 470—690                   | 0,08                       | 92          |
| α-Fe   | 1200—1500                 | 3,6                        | 298         | α-Zr    | 600—1000                  | $5 \cdot 10^{-8}$          | 92          |
| γ-Fe   | 1350—1600                 | 1,1                        | 284         |         | 900—1100                  | $5 \cdot 10^{-2}$          | 218         |
|        | 1700—1800                 | 6,8                        | 259         | β-Zr    | 1200—1800                 | 0,0024                     | 159         |
| δ-Fe   | 1000—1400                 | 0,48                       | 276         | Cr      | 1200—1500                 | $10^{-4}$                  | 221         |
| Ni     | 1300—1700                 | 1,9                        | 285         |         | 1500—1900                 | 0,28                       | 309         |
| Pb     | 450—600                   | 0,28                       | 102         | Hf      | 2070—2300                 | 0,0012                     | 162         |
| Pd     | 1300—1800                 | 0,20                       | 267         | Li      | 208—520                   | 0,24                       | 55,2        |
| Pt     | 1500—2000                 | 0,22                       | 279         | Mo      | 2000—2200                 | 2,8                        | 465         |
| δ-Pu   | 310—700                   | 0,0045                     | 100         |         | 2100—2600                 | 0,3                        | 398         |
| α-Th   | 1400—1700                 | 700                        | 350         | Na      | 208—520                   | 0,2                        | 41,9        |
| β-Th   | 1700—1800                 | $10^6$                     | 417         | Nb      | 1150—2700                 | 1,1                        | 402         |
| Be, ⊥  | 800—1300                  | 0,52                       | 158         | ε-Pu    | 800—900                   | 0,027                      | 77,4        |
| Be,    | 800—1300                  | 0,62                       | 165         | Rb      | 208—520                   | 0,23                       | 39,4        |
| Ta     | 1500—2400                 | 0,12                       | 413         | W       | 1560—1730                 | $6,3 \cdot 10^7$           | 570         |
|        | 2100—2800                 | 2                          | 462         |         | 2300—3000                 | 0,54                       | 502         |
| α-U    | 850—920                   | 0,002                      | 168         |         | 2900—3600                 | 43                         | 640         |
| β-U    | 970—1020                  | 0,014                      | 176         | In, ⊥   | 320—420                   | 3,7                        | 78,2        |
| γ-U    | 1050—1300                 | 0,002                      | 113         | In,     | 320—420                   | 2,7                        | 78,2        |
| V      | 1150—1600                 | 0,36                       | 308         | β-Sn, ⊥ | 430—500                   | 10,7                       | 110         |
|        | 1600—2100                 | 210                        | 394         | β-Sn,   | 430—500                   | 7,7                        | 107         |
| La     | 930—1120                  | 1,5 [10]                   | 189 [10]    | Cs      | 1100—1300                 | 47                         | 25,7        |
| Pr     | 1100—1200                 | 0,087 [10]                 | 123 [10]    |         | 1000—1200                 | 11                         | 23,9        |
| Sb, ⊥  | 770—900                   | 0,10                       | 150         | K       | 220—330                   | 0,16                       | 3,92        |
| Sb,    | 770—900                   | 56                         | 201         |         |                           |                            |             |

Таблица 17.22. Параметры выражения (17.13) для коэффициента самодиффузии в некоторых кристаллах

| Кристалл                   | Ag   | C (графит) | Ge        | α-P белый           | Xe      |
|----------------------------|------|------------|-----------|---------------------|---------|
| T, К                       | 78   | 2270—2620  | 1000—1200 | 273—303             | 121—158 |
| $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | 350  | 10         | 10,8      | $1,1 \cdot 10^{-3}$ | 7,3     |
| Q, кДж/моль                | 17,4 | 680        | 291       | 39,3                | 34,9    |

Таблица 17.23. Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в серебре [8]

| Примесь | T, К    | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|---------|---------|----------------------------|-------------|
| Fe      | 718—927 | 2,42                       | 205         |
| Co      | —       | 104                        | 251         |
| Ni      | 750—950 | 21,9                       | 230         |
| Cu      | 700—950 | 1,23                       | 193         |
| Zn      | 640—925 | 0,54                       | 174         |
| Ge      | —       | 0,084                      | 153         |
| Ru      | 794—945 | 180                        | 276         |
| Pd      | 735—939 | 9,57                       | 238         |
| Ag      | 450—900 | 0,81                       | 191         |
| Cd      | 592—937 | 0,44                       | 175         |
| In      | 592—937 | 0,41                       | 170         |
| Sn      | 592—937 | 0,25                       | 164         |
| Sb      | 468—942 | 0,17                       | 160         |
| Au      | 650—950 | 0,26                       | 191         |
| Hg      | 650—950 | 0,08                       | 160         |
| Tl      | 650—800 | 0,15                       | 159         |
| Pb      | 700—825 | 0,22                       | 160         |

Таблица 17.24. Параметры выражения (17.13) для диффузии малой примеси в меди [8]

| Примесь | T, К     | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|---------|----------|----------------------------|-------------|
| Fe      | 719—1074 | 1,4                        | 217         |
| Co      | 701—1077 | 1,93                       | 226         |
| Ni      | 743—1076 | 2,7                        | 237         |
| Cu      | 500—1000 | 70                         | 234         |
| Zn      | <1356    | 0,34                       | 191         |
| Ga      | <1356    | 0,55                       | 192         |
| As      | <1356    | 0,12                       | 176         |
| Pd      | 807—1056 | 1,71                       | 228         |
| Ag      | <1356    | 0,63                       | 195         |
| Cd      | <1356    | 0,93                       | 189         |
| Sb      | 600—1000 | 0,34                       | 176         |
| Au      | 700—1000 | 0,15                       | 192         |
| Hg      | <1356    | 0,35                       | 184         |
| Tl      | 785—996  | 0,71                       | 181         |

Таблица 17.25. Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в золоте [8]

| Примесь | T, К     | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|---------|----------|----------------------------|-------------|
| Fe      | 700—950  | 0,082                      | 174         |
| Co      | 700—950  | 0,068                      | 174         |
| Ni      | 700—950  | 0,034                      | 176         |
| Ag      | 700—1000 | 0,072                      | 168         |
| Au      | 700—1050 | 0,091                      | 175         |
| Pt      | 800—1050 | 7,6                        | 255         |
| Hg      | 500—1030 | 0,116                      | 157         |

Таблица 17.26. Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в никеле [8]

| Примесь | T, К      | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|---------|-----------|----------------------------|-------------|
| Mg      | 1070—1250 | $2,3 \cdot 10^{-5}$        | 131         |
|         | 1400—1600 | 0,44                       | 235         |
| Al      | 1070—1250 | 1,1                        | 249         |
|         | 1400—1600 | 1,87                       | 268         |
| Si      | 1070—1250 | 10,6                       | 271         |
|         | 1400—1600 | 1,5                        | 258         |
| Ti      | 1400—1600 | 0,86                       | 257         |
| Cr      | 940—1170  | 0,03                       | 171         |
|         | 1400—1600 | 1,1                        | 273         |
| Mn      | 1400—1600 | 7,5                        | 281         |
| Fe      | 1200—1800 | 0,8                        | 255         |
| Co      | 1020—1460 | 0,75                       | 271         |
|         | 1430—1650 | 1,11                       | 272         |
| Cu      | 1320—1620 | 0,57                       | 258         |
| Mo      | 1400—1600 | 3                          | 288         |
| W       | 1400—1600 | 11,1                       | 322         |
| Au      | 1200—1400 | 2                          | 272         |

Таблица 17.27. Параметры выражения (17.13) для диффузии различных примесей в металлах III и IV групп. В скобках указаны индексы Миллера, характеризующие направление диффузионного потока [10]

| Металл      | Примесь         | Диапазон температур, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|-------------|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------|
| Pb          | Cu              | >500                   | $7,9 \cdot 10^{-3}$        | 33,5        |
|             | Ag              | >400                   | $4,6 \cdot 10^{-2}$        | 60,3        |
|             |                 | 390—570                | $7,5 \cdot 10^{-2}$        | 63,6        |
|             | Au              | 460—570                | $4,1 \cdot 10^{-3}$        | 39,1        |
|             |                 | 460—600                | $8,7 \cdot 10^{-3}$        | 41,9        |
|             | Zn              | 450—570                | $1,6 \cdot 10^{-2}$        | 47,3        |
|             | Cd              | >420                   | 0,41                       | 88,9        |
|             | Hg              | 470—570                | 1,05                       | 95          |
|             | Tl              | 480—600                | 0,5                        | 104         |
|             | Sn              | 510—560                | 0,16                       | 96,5        |
|             | Na              | 520—490                | 6,3                        | 119         |
|             | Ni              | 480—870                | $9,4 \cdot 10^{-3}$        | 44,4        |
|             | Pd              | 480—860                | $3,8 \cdot 10^{-3}$        | 36          |
|             | Cu              | 410—500                | $2,4 \cdot 10^{-3}$        | 33,1        |
| Sn          | Au [001]        | 400—510                | $5,8 \cdot 10^{-3}$        | 46          |
|             | [100]           | 400—510                | 0,16                       | 74,1        |
|             | Ag [001]        | 400—510                | $7,1 \cdot 10^{-3}$        | 51,5        |
|             | [100]           | 400—510                | 0,18                       | 77          |
|             | Zn              | 360—510                | $5,9 \cdot 10^{-3}$        | 49,4        |
|             | Cd [001]        | 460—500                | 220                        | 118         |
|             | [100]           | 460—500                | 120                        | 113         |
|             | Hg [001]        | 450—500                | 7,5                        | 106         |
|             | [110]           | 450—500                | 30                         | 112         |
|             | In [001]        | 450—500                | 12                         | 107         |
|             | In [100]        | 450—500                | 34                         | 108         |
|             | Sb [001]        | 470—500                | 79                         | 122         |
|             | [100]           | 470—500                | 77                         | 123         |
|             |                 |                        | $9 \cdot 10^{-3}$          | 281         |
| In          | Au              | 300—420                |                            |             |
| Tl          | Ag              | 300—420                | 0,11                       | 48,2        |
|             | Ag              | 360—500                | 0,033                      | 48,2        |
| $\beta$ -Al | Au              | 390—500                | $5,3 \cdot 10^{-4}$        | 21,8        |
|             | Na <sup>+</sup> | 470—670                | $2 \cdot 10^{-4}$          | 15,9        |
|             | Ag <sup>+</sup> | 470—670                | $1,65 \cdot 10^{-4}$       | 16,8        |
|             | K <sup>+</sup>  | 470—670                | $0,78 \cdot 10^{-4}$       | 22,4        |
|             | Rb <sup>+</sup> | 470—670                | $0,34 \cdot 10^{-4}$       | 30,1        |
|             | Li <sup>+</sup> | 470—670                | $14,5 \cdot 10^{-4}$       | 36,4        |
|             | Tl <sup>+</sup> | 470—670                | $0,65 \cdot 10^{-4}$       | 34,4        |

Таблица 17.28. Параметры выражения (17.13) для диффузии атомов примесей в щелочных металлах [10]

| Металл | Примесь | Диапазон температур, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль |
|--------|---------|------------------------|----------------------------|----------------|
| Li     | Cu      | 320—450                | 0,47                       | 38,6           |
|        | Ag      | 340—430                | 0,12                       | 52,8           |
|        | Au      | 320—420                | 0,21                       | 46,1           |
|        | Zn      | 330—450                | 0,57                       | 54,5           |
| K      | Na      | 330—450                | 0,41                       | 52,8           |
|        | Au      | 280—326                | 1300                       | 12,4           |
| Na     | Au      | 270—350                | 3,3                        | 9,2            |

Таблица 17.29. Параметры выражения (17.13) для диффузии атомов примеси в лантанидах и актинидах [10]

| Металл | Примесь | Интервал температур, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль |
|--------|---------|------------------------|----------------------------|----------------|
| La     | Au      | 980—1070               | 0,022                      | 75,8           |
|        | Cu      | 930—1060               | 0,084                      | 75,8           |
|        |         | 1090—1190              | 0,057                      | 74,5           |
|        | Co      | 880—1040               | 0,047                      | 68,7           |
| Pr     | Au      | 880—1020               | 0,043                      | 82,5           |
|        |         | 1070—1180              | 0,033                      | 84,1           |
|        | Ag      | 880—1040               | 0,14                       | 106            |
|        |         | 1070—1190              | 0,032                      | 90,0           |
| Nd     | Zn      | 880—1040               | 0,18                       | 104            |
|        |         | 1100—1200              | 0,63                       | 113            |
|        | Co      | 1050—1350              | $3,5 \cdot 10^{-4}$        | 52,8           |
|        | Fe      | 1050—1350              | $2,7 \cdot 10^{-4}$        | 50,2           |
| U      | Ni      | 1050—1350              | $5,4 \cdot 10^{-4}$        | 65,8           |
|        | Mn      | 1050—1350              | $1,8 \cdot 10^{-4}$        | 58,2           |
|        | Cr      | 1050—1350              | $5,4 \cdot 10^{-3}$        | 103            |
|        | Cu      | 1050—1350              | $2 \cdot 10^{-3}$          | 101            |
|        | Nb      | 1050—1350              | 0,049                      | 166            |

Таблица 17.30. Параметры температурной зависимости коэффициента диффузии малой примеси в  $\beta$ -Ti [8]

$$D = D_{01} \exp(-Q_1/RT) + D_{02} \exp(-Q_2/RT)^*$$

| Примесь | $T$ , К   | $D_{01}$ , см <sup>2</sup> /с | $Q_1$ , кДж/моль | $D_{02}$ , см <sup>2</sup> /с | $Q_2$ , кДж/моль |
|---------|-----------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
| Ti      | 1170—1800 | 2                             | 125              | 1,0                           | 250              |
| P       | 1220—1900 | 36,2                          | 101              | 5                             | 237              |
| Sc      | 1200—1560 | 21                            | 137              | 34                            | —                |
| V       | 1200—1820 | 10                            | 146              | 3,4                           | 258              |
| Cr      | 1220—1900 | 74                            | 154              | 14                            | 274              |
| Mn      | 1200—1900 | 76                            | 144              | 12                            | 270              |
| Fe      | 1200—1900 | 80                            | 126              | 15                            | 254              |
| Co      | 1200—1900 | 130                           | 130              | 16                            | 257              |
| Ni      | 1200—1900 | 170                           | 133              | 20                            | 252              |
| Nb      | 1270—1900 | 13                            | 146              | 9,5                           | 291              |
| Mo      | 1170—1900 | 7                             | 155              | 3,6                           | 272              |
| Sn      | 1230—1870 | 3,8                           | 132              | 9,5                           | 291              |
| Ta      | 1300—1900 | 7,2                           | 151              | 50                            | 335              |

\* При низких температурах преобладает первый член выражения, при высоких — второй.

Таблица 17.31. Параметры выражения (17.10) для коэффициента взаимной диффузии металлов и сплавов. Прочерки означают, что концентрация примеси исчезающе мала [1]

| Диффундирующий элемент | Диффузионная среда | Атомная концентрация диффундирующего элемента, % | $T$ , К   | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль |
|------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|-----------|----------------------------|----------------|
| Ag                     | Al                 | 1,26                                             | 740—850   | 1,1                        | 137            |
|                        | Au                 | 9                                                | 1120—1270 | $2,9 \cdot 10^{-2}$        | 159            |
|                        | Cu                 | 3                                                | 1000—1070 | $2,9 \cdot 10^{-2}$        | 156            |
|                        | Pb                 | 0,12                                             | 500—560   | $7,4 \cdot 10^{-2}$        | 64             |
| Al                     | Cu                 | 15—21                                            | 770—1120  | $7,1 \cdot 10^{-2}$        | 164            |
|                        | Ag                 | 100                                              | 500—870   | $5,3 \cdot 10^{-4}$        | 125            |
|                        |                    | 18,4                                             | 1040—1200 | $1,1 \cdot 10^{-4}$        | 112            |
|                        | Cu                 | 2,4—3,5                                          | 670—1250  | $6,8 \cdot 10^{-6}$        | 94             |
| Bi                     | Pb                 | 0,03—0,09                                        | 370—570   | 0,35                       | 59,5           |
|                        | $\alpha$ -Fe       | —                                                | <1800     | $10^5$                     | 260            |
|                        | Pb                 | 2,0                                              | 500—560   | $1,8 \cdot 10^{-3}$        | 77             |
|                        | Fe                 | Карбонизация                                     | 1100—1400 | $1,67 \cdot 10^{-2}$       | 120            |
| C                      |                    | 1,1 мас. %                                       | 1200—1500 | 0,49                       | 153            |
|                        |                    | 0,1—1 мас. %                                     | 1000—1500 | 0,12                       | 137            |
|                        | $\alpha$ -Fe       | —                                                | <1800     | $7,9 \cdot 10^{-3}$        | 76             |
|                        |                    | —                                                | <1800     | $2 \cdot 10^{-2}$          | 84             |
| Cd                     | Ag                 | 2,0                                              | 920—1170  | $4,9 \cdot 10^{-5}$        | 94             |



| Диффундирующий элемент | Диффузионная среда | Атомная концентрация диффундирующего элемента, % | T, К      | D <sub>0</sub> , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-------------|
| Co                     | Cu                 | 3                                                | <1200     | 0,44                                | 175         |
|                        | Pb                 | 1,6                                              | 1000—1130 | 3,04·10 <sup>-4</sup>               | 99          |
|                        | α-Fe               | —                                                | 440—520   | 1,83·10 <sup>-3</sup>               | 65          |
|                        | γ-Fe               | —                                                | <1800     | 0,4                                 | 226         |
|                        | Сталь              | —                                                | <1800     | 1,2·10 <sup>5</sup>                 | 435         |
| Cr                     | α-Fe               | —                                                | <1800     | 90                                  | 335         |
|                        | γ-Fe               | —                                                | <1800     | 3·10 <sup>4</sup>                   | 343         |
|                        | Сталь              | —                                                | <1800     | 1,8·10 <sup>4</sup>                 | 406         |
|                        | W                  | —                                                | <1800     | 10                                  | 314         |
| Cs                     | W                  | 1-й адсорбционный слой                           | 300—700   | 0,2                                 | 58,6        |
|                        | W                  | 2-й адсорбционный слой                           | 300—700   | 1,64·10 <sup>-2</sup>               | 96          |
| Cu                     | Ag                 | 2,0                                              | 920—1170  | 5,9·10 <sup>-5</sup>                | 104         |
|                        | Al                 | Эвтектика                                        | 700—800   | 2,3                                 | 146         |
|                        | Au                 | 0,085—0,17                                       | 730—840   | 8,4·10 <sup>-2</sup>                | 137         |
|                        | Ge                 | 100                                              | 570—890   | 1,06·10 <sup>-3</sup>               | 115         |
|                        | Pt                 | 25,6                                             | 700—1000  | 5,8·10 <sup>-4</sup>                | 115         |
| Fe                     | β-латунь (45 % Zn) | —                                                | <1200     | 1,9·10 <sup>-4</sup>                | 172         |
|                        | Au                 | 13,9                                             | 1310—1730 | 4,8·10 <sup>-2</sup>                | 233         |
|                        | Fe—20 %            | —                                                | <1100     | 3,8·10 <sup>-2</sup>                | 104         |
|                        | Ni—C               | —                                                | —         | —                                   | —           |
|                        | Ni                 | —                                                | <1800     | 18·10 <sup>-0,92 [C]*</sup>         | 314 [C]     |
|                        | W                  | —                                                | <1800     | 71·10 <sup>-0,65 [C]</sup>          | 314 [C]     |
|                        | Ge                 | 0,04                                             | <1800     | 8,4·10 <sup>-3</sup>                | 214         |
|                        | Hg                 | Самодиффузия                                     | 2200—2800 | 11,5                                | 586         |
|                        | In                 | 4                                                | <1200     | 87                                  | 308         |
|                        | Li                 | 20                                               | 430—475   | 2,6                                 | 82          |
| Mg                     | Si                 | —                                                | 920—1170  | 7,3·10 <sup>-5</sup>                | 102         |
|                        | Al                 | —                                                | <1200     | 2,5·10 <sup>-3</sup>                | 49,4        |
|                        | Al                 | Эвтектика                                        | <1700     | 2,3·10 <sup>-3</sup>                | 63,6        |
|                        | Al                 | 5,5—11,0                                         | 640—710   | 1,5·10 <sup>-2</sup>                | 161         |
| Mn                     | Cu                 | 8—11,4                                           | 670—850   | 0,1·10 <sup>-1</sup>                | 119         |
|                        | W                  | Монокристалл                                     | 670—1120  | 7,2·10 <sup>-6</sup>                | 96          |
| Mo                     | W                  | Поликристалл                                     | 1800—2530 | 6,3·10 <sup>-4</sup>                | 33,7        |
|                        | Fe                 | —                                                | 1800—2530 | 5·10 <sup>-3</sup>                  | 33,7        |
|                        | Th                 | —                                                | <1800     | 3,1·10 <sup>-3</sup>                | 75          |
|                        | α-Ti               | —                                                | <1800     | 3·10 <sup>-3</sup>                  | 76          |
| Ni                     | β-Ti               | —                                                | <1800     | 6,6·10 <sup>-3</sup>                | 78          |
|                        | Au                 | —                                                | <1970     | 2,1·10 <sup>-3</sup>                | 94          |
|                        | Cu                 | —                                                | <1940     | 1,2·10 <sup>-2</sup>                | 190         |
|                        | Pt                 | —                                                | <1940     | 0,35                                | 142         |
|                        | Au                 | 15,0                                             | 1070—1280 | 1,74·10 <sup>-3</sup>               | 131         |
|                        | Cu                 | 7,5—11,8                                         | 820—1220  | 6,5·10 <sup>-5</sup>                | 125         |
|                        | Pt                 | 14,9                                             | 1320—1670 | 7,8·10 <sup>-4</sup>                | 181         |
| O                      | β-Ti               | —                                                | <1940     | 1,6                                 | 202         |
|                        | Ag                 | 20,2                                             | 720—1200  | 6,4·10 <sup>-6</sup>                | 84,5        |
|                        | Au                 | 17,1                                             | 1000—1250 | 1,13·10 <sup>-3</sup>               | 91,5        |
| Pt                     | Cu                 | 4,3—6,2                                          | 760—1240  | 1,6·10 <sup>-6</sup>                | 163         |
|                        | Au                 | 20,1                                             | 1000—1250 | 1,24·10 <sup>-3</sup>               | 163         |
|                        | Cu                 | 2,4—3,5                                          | 760—1230  | 1,0·10 <sup>-6</sup>                | 91,5        |
| Sb                     | Ag                 | 2,0                                              | 920—1170  | 5,3·10 <sup>-5</sup>                | 91          |
|                        | Al                 | 0,5                                              | 740—870   | 0,9                                 | 128         |
| Sn                     | Ag                 | 20                                               | 920—1170  | 7,8·10 <sup>-6</sup>                | 89,5        |
|                        | Cu                 | 3,9—5,6                                          | 670—1120  | 4,1·10 <sup>-3</sup>                | 131         |
| β-Sn                   | Pb                 | 2,0                                              | 510—560   | 4,0                                 | 110         |
|                        | W                  | Диффузия на границе между зернами                | 2050—2500 | 1,13                                | 394         |
| Th                     | W                  | Объемная диффузия                                | 2400      | 1,0                                 | 503         |
|                        | W                  | Поверхностная диффузия                           | 1650      | 0,47                                | 278         |
|                        | Pb                 | 2,0                                              | 500—550   | 2,5·10 <sup>-2</sup>                | 81          |
| U                      | W                  | —                                                | 2000      | 1,14                                | 420         |

| Диффундирующий элемент | Диффузионная среда        | Атомная концентрация диффундирующего элемента, % | T, К      | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|-----------|----------------------------|-------------|
| W                      | $\alpha$ -Fe              | —                                                | <1800     | 380                        | 293         |
|                        | $\gamma$ -Fe              | —                                                | <1800     | 10 <sup>3</sup>            | 377         |
|                        | Сталь                     | —                                                | <1800     | 13                         | 314         |
| Y                      | W                         | —                                                | 2000      | 0,11                       | 260         |
| Zn                     | Zn                        | Самодиффузия в Zn чистотой 99,999 %              | <690      | 0,22                       | 60          |
|                        |                           | Самодиффузия в Zn чистотой 99,99 %               | <690      | 0,38                       | 61          |
|                        | Al                        | 0,84                                             | 690—730   | 12                         | 116         |
|                        | Cu                        | 6,8—9,7                                          | 630—1150  | 3·10 <sup>-6</sup>         | 82,5        |
|                        |                           | 3                                                | 1000—1130 | 3,7·10 <sup>-6</sup>       | 92          |
|                        |                           | 0—28,6                                           | 910—1150  | 3,2·10 <sup>-3</sup>       | 176         |
|                        | $\beta$ -латунь (45 % Zn) | —                                                | <1100     | 0,024                      | 95,5        |
| Zr                     | W                         | —                                                | 2000      | 1,1                        | 326         |

\* [C] — атомная концентрация углерода, %.

Таблица 17.32. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии ионов в кристаллах солей [10]

| Ион             | Соль | Диапазон температур, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|-----------------|------|------------------------|----------------------------|-------------|
| Li <sup>+</sup> | LiF  | 850—1000               | 0,8                        | 192         |
|                 |      | 1000—1100              | 5,6                        | 289         |
| Na <sup>+</sup> | NaCl | 550—820                | 3,5·10 <sup>-6</sup>       | 81,2        |
|                 |      | 860—1070               | 76,9                       | 196         |
| Na <sup>+</sup> | NaBr | 770—950                | 0,67                       | 147         |
| K <sup>+</sup>  | KF   | 870—1100               | 2                          | 172         |
| K <sup>+</sup>  | KCl  | 800—950                | 137                        | 207         |
|                 |      | 860—1020               | 1,8·10 <sup>-5</sup>       | 76          |
| K <sup>+</sup>  | KBr  | 730—1000               | 0,01                       | 122         |
| K <sup>+</sup>  | KI   | 730—950                | 10 <sup>-5</sup>           | 62          |
| Rb <sup>+</sup> | RbCl | 840—970                | 33,3                       | 193         |
| Cs <sup>+</sup> | CsCl | 630—730                | 1,1                        | 130         |
|                 |      | 760—880                | 0,1                        | 134         |
| Cs <sup>+</sup> | CsI  | 570—770                | 80                         | 158         |
| Cl <sup>-</sup> | NaCl | 770—1020               | 60,7                       | 206         |
| Br <sup>-</sup> | NaBr | 920—1020               | 1,0                        | 164         |
| Cl <sup>-</sup> | KCl  | 770—1010               | 178                        | 216         |
| Br <sup>-</sup> | KBr  | 670—970                | 10 <sup>-3</sup>           | 196         |
| I <sup>-</sup>  | KI   | 730—950                | 1,2·10 <sup>-3</sup>       | 108         |
| Cl <sup>-</sup> | RbCl | 870—970                | 33,3                       | 193         |
| Cl <sup>-</sup> | CsCl | 550—730                | 1,51                       | 122         |
|                 |      | 760—880                | 0,7                        | 152         |
| I <sup>-</sup>  | CsI  | 680—830                | 0,39                       | 122         |

Таблица 17.33. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии примесей в кристаллах солей [10]

| Кристалл | Примесь | Диапазон температур, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|----------|---------|------------------------|----------------------------|-------------|
| NaF      | Li      | 850—1000               | 0,8                        | 192         |
|          |         | 1000—1100              | 5,6                        | 290         |
| NaCl     | K       | 670—930                | —                          | 48,3        |

Продолжение табл. 17.33

| Кристалл | Примесь | Диапазон температур, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | Q, кДж/моль |
|----------|---------|------------------------|----------------------------|-------------|
|          | Rb      | 870—1020               | 28,5                       | 192         |
|          | Cs      | 870—970                | 1,62                       | 192         |
|          | Cu      | 620—920                | 33,8                       | 138         |
|          | Ag      | 850—1000               | 380                        | 192         |
|          | Br      | 770—920                | 20                         | 187         |
|          | I       | 800—970                | 500                        | 216         |
|          | Ca      | 700—1020               | 6·10 <sup>-4</sup>         | 87          |
|          | Sr      | 390—1070               | 1,7·10 <sup>-3</sup>       | 126         |
|          | Cd      | 800—930                | 3,9·10 <sup>-3</sup>       | 251         |
|          | Mn      | 670—970                | 10 <sup>-4</sup>           | 65          |
|          | Zn      | 810—1000               | 0,04                       | 94,5        |
|          | Pb      | 600—800                | 0,015                      | 94,5        |
|          | Co      | 880—1030               | 8·10 <sup>-3</sup>         | 106         |
|          | Ni      | 900—1020               | 0,02                       | 125         |
|          | Hg      | 720—820                | 8,2·10 <sup>-5</sup>       | 55          |
|          | Au      | —                      | 0,2                        | 103         |
| NaI      | TI      | 670—910                | 5·10 <sup>-3</sup>         | 113         |
| KBr      | TI      | 410—480                | 0,091                      | 96,5        |
|          |         | 620—770                | 50                         | 192         |
|          | Pb      | 550—670                | 1,5·10 <sup>-3</sup>       | 87,5        |
| KCl      | Li      | 770—1000               | 20                         | 142         |
|          | Na      | 860—1020               | 2,2                        | 169         |
|          | Rb      | 880—1040               | 26,8                       | 195         |
| KCl      | Cs      | 840—1020               | 0,7                        | 169         |
|          | TI      | 500—730                | 5,8·10 <sup>-11</sup>      | 23          |
|          |         | 730—1000               | 1,3·10 <sup>-3</sup>       | 126         |
|          | Cu      | 620—920                | 10,6                       | 118         |
|          | Ag      | 470—920                | —                          | 40,6        |
|          | I       | 770—920                | 50                         | 193         |
|          | OH      | 670—890                | 1,2·10 <sup>3</sup>        | 193         |
|          | Cl      | 770—920                | 1,5·10 <sup>-3</sup>       | 109         |
|          | Cd      | 620—770                | 4,7·10 <sup>-5</sup>       | 52,5        |
|          | Pb      | 500—750                | 10 <sup>-3</sup>           | 96,5        |
|          | Eu      | 700—820                | 0,064                      | 124         |
|          | Co      | 470—920                | —                          | 19,3        |
|          | Bi      | 670—950                | 5,6·10 <sup>-3</sup>       | 94          |
|          | Ce      | 770—970                | 1,1·10 <sup>-3</sup>       | 100         |

Таблица 17.34. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии иона  $\text{Ag}^+$  в кристаллах [1]

| Диффузионная среда            | $T, K$   | $D_0, \text{см}^2/\text{с}$ | $Q, \text{кДж/моль}$ |
|-------------------------------|----------|-----------------------------|----------------------|
| $\alpha\text{-AgI}$           | 454—744  | —                           | 9,45                 |
| $\alpha\text{-CuI}$           | 685—753  | $4,5 \cdot 10^{-3}$         | 28,3                 |
| $\alpha\text{-Cu}_2\text{S}$  | 586—1192 | $3,3 \cdot 10^{-4}$         | 19,1                 |
| $\alpha\text{-Cu}_2\text{Te}$ | 603—794  | 2,4                         | 87                   |
| $\alpha\text{-AgI}$           | 451—701  | $1,6 \cdot 10^{-4}$         | 9,45                 |
| $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$  | 443—693  | $4,6 \cdot 10^{-4}$         | 13,3                 |
| $\alpha\text{-Ag}_2\text{Se}$ | 421—673  | $1,6 \cdot 10^{-4}$         | 12,3                 |
| $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$ | 428—678  | $3,8 \cdot 10^{-5}$         | 11,1                 |
| $\alpha\text{-Ag}_2\text{I}$  | 473—653  | $5,8 \cdot 10^{-3}$         | 19,1                 |
| NaCl                          | <550     | 1,6                         | 75                   |
|                               | >550     | 3,1                         | 174                  |
| $\text{PbCl}_2$               | 439—743  | 7,7                         | 154                  |
| $\text{PbI}_2$                | 387—438  | 7,8                         | 126                  |
|                               | 528—588  | 10,6                        | 127                  |
| PbS                           | 733—1043 | 1,3                         | 176                  |
| NaBr                          | —        | 50                          | 199                  |
| $\alpha\text{-Ag}_2\text{Se}$ | —        | $6,7 \cdot 10^{-4}$         | 85,5                 |

Таблица 17.35. Коэффициент диффузии ионов в кристаллах при различных температурах [1]

| Диффундирующий ион | Диффузионная среда            | $T, K$ | $Q, 10^{-6} \text{см}^2/\text{с}$ |
|--------------------|-------------------------------|--------|-----------------------------------|
| $\text{Ag}^+$      | $\text{CuBr}$                 | 518    | 51                                |
| $\text{Cu}^+$      | $\alpha\text{-Cu}_2\text{S}$  | 503    | 1,85                              |
|                    |                               | 603    | 4,6                               |
|                    |                               | 693    | 9,4                               |
|                    | $\alpha\text{-Cu}_2\text{Te}$ | 603    | 0,359                             |
|                    |                               | 749    | 1,98                              |
|                    |                               | 794    | 4,66                              |
|                    | $\text{Cu}_3\text{Sb}$        | 723    | 0,139                             |
| $\text{Li}^+$      | $\text{AgCl}$                 | 511    | 0,24                              |
|                    | $\alpha\text{-AgI}$           | 753    | 37—41                             |
|                    | $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$  | 443    | 0,4                               |
|                    |                               | 503    | 4,1                               |
|                    |                               | 603    | 6,3                               |
|                    |                               | 693    | 16,5                              |
| $\text{Na}^+$      | $\text{AgCl}$                 | 723    | 0,116                             |
|                    | $\text{AgBr}$                 | 573    | 0,023                             |
| $\text{Pb}^{++}$   | $\text{PbCl}_2$               | 473    | 4,5                               |
|                    |                               | 523    | 11                                |
|                    |                               | 578    | 15                                |
|                    |                               | 653    | 23                                |
| $\text{Pb}^{++}$   | $\text{PbI}_2$                | 387    | $7,3 \cdot 10^{-11}$              |
|                    |                               | 420    | $1,35 \cdot 10^{-9}$              |
|                    |                               | 438    | $7,35 \cdot 10^{-9}$              |
| $\text{Cl}^-$      | $\text{AgI}$                  | 453    | $1,1 \cdot 10^{-4}$               |
| $\text{Se}^{2-}$   | $\text{Cu}_2\text{S}$         | 844    | $1,1 \cdot 10^{-3}$               |
|                    |                               | 967    | $4,9 \cdot 10^{-3}$               |

Таблица 17.36. Коэффициент взаимной диффузии твердых солей [1]

| Диффундирующее вещество  | Диффузионная среда     | $T, K$ | $D, 10^{-11} \text{см}^2/\text{с}$ |
|--------------------------|------------------------|--------|------------------------------------|
| Ag (из $\text{AgNO}_3$ ) | Na-стекло              | 627    | 25,2                               |
|                          | Na-пермутит            | 627    | 14,8                               |
| $\text{Ag}_4\text{Sn}$   | $\text{Cu}_4\text{Sn}$ | 723    | 231                                |
| $\text{BaMoO}_4$         | $\text{BaWO}_4$        | 1223   | 9,61                               |
| $\text{BaWO}_4$          | $\text{BaMoO}_4$       | 1223   | 3,47                               |
| $\text{MgMoO}_4$         | $\text{MgWO}_4$        | 1073   | 2,31                               |
| $\text{MgWO}_4$          | $\text{MgMoO}_4$       | 1073   | 1,39                               |
| $\text{SrMoO}_4$         | $\text{SrWO}_4$        | 1223   | 9,14                               |
| $\text{SrWO}_4$          | $\text{SrMoO}_4$       | 1223   | 3,01                               |
| $\text{ZnMoO}_4$         | $\text{ZnWO}_4$        | 1073   | 3,94                               |
|                          |                        | 1123   | 6,36                               |
| $\text{ZnWO}_4$          | $\text{ZnMoO}_4$       | 1073   | 1,00                               |
|                          |                        | 1123   | 2,89                               |

Таблица 17.37. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии газов в твердых телах [1]

| Диффундирующий газ | Диффузионная среда | $T, K$ | $D_0, 10^{-6} \text{см}^2/\text{с}$ | $Q, \text{кДж/моль}$ |
|--------------------|--------------------|--------|-------------------------------------|----------------------|
| $\text{H}_2$       | $\text{SiO}_2$     | 473    | 8,5                                 | 42,7                 |
|                    |                    | 773    | 11                                  | 42,7                 |
| He                 | $\text{SiO}_2$     | 293    | 5,7                                 | 23                   |
|                    |                    | 773    | 2,9                                 | 23                   |
|                    | Пирекс             | 293    | 1,3                                 | 36,4                 |
| $\text{NH}_3$      | Анальцим*          | 773    | 5,5                                 | —                    |

\* Природный алломосиликат.

Таблица 17.38. Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии атомов водорода и его изотопов в металлах [9]

| Атом | Металл             | $T, K$   | $D_0, \text{см}^2/\text{с}$ | $Q, \text{кДж/моль}$ |
|------|--------------------|----------|-----------------------------|----------------------|
| H    | Pd                 | <900     | $2,9 \cdot 10^{-3}$         | 22,2                 |
| H    | Ni                 | >631     | $6,9 \cdot 10^{-3}$         | 40,5                 |
|      |                    | <631     | $4,8 \cdot 10^{-3}$         | 39,4                 |
| H    | $\alpha\text{-Fe}$ | <1800    | $7,5 \cdot 10^{-4}$         | 10                   |
| H    | Nb                 | >273     | $5,0 \cdot 10^{-4}$         | 10,2                 |
|      |                    | <223     | $0,9 \cdot 10^{-4}$         | 6,5                  |
| D    | Nb                 | <1000    | $5,2 \cdot 10^{-4}$         | 12,3                 |
| T    | Nb                 | <1000    | $4,5 \cdot 10^{-4}$         | 13                   |
| H    | Ta                 | >273     | $4,4 \cdot 10^{-4}$         | 13,5                 |
|      |                    | <200     | $2 \cdot 10^{-6}$           | 3,85                 |
| D    | Ta                 | <600     | $4,6 \cdot 10^{-4}$         | 15,5                 |
| H    | V                  | <600     | $3,1 \cdot 10^{-4}$         | 4,36                 |
| D    | V                  | <600     | $3,8 \cdot 10^{-4}$         | 7,12                 |
| H    | Cu                 | 600—1100 | $3,5 \cdot 10^{-4}$         | 39,5                 |
| D    | Cu                 | 800—1100 | $2,5 \cdot 10^{-4}$         | 39,2                 |
| T    | Cu                 | 800—1100 | $2 \cdot 10^{-4}$           | 39,2                 |

Таблица 17.39. Параметры соотношения (17.13)  
для коэффициента диффузии атомов инертных газов  
в кристаллах солей [10]

| Кристалл | Газ | Диапазон температур, К | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль |
|----------|-----|------------------------|----------------------------|----------------|
| KCl      | Ar  | >670                   | $7,9 \cdot 10^{-4}$        | 36,7           |
|          | Kr  | 450—520                | $8 \cdot 10^{-5}$          | 107            |
|          |     | 520—770                | $10^6$                     | 203            |
| KBr      | Ar  | 290—570                | $10^6$                     | 145            |
|          | He  | 290—570                | 10                         | 135            |
|          | He  | 420—770                | 1,5                        | 98             |
| KI       | Kr  | 570—1000               | 2,5                        | 132            |
| RbF      | Kr  | 630—970                | $7,9 \cdot 10^4$           | 43             |
| RbCl     | Kr  | 460—600                | $4 \cdot 10^7$             | 163            |
| RbBr     |     | >600                   | $5 \cdot 10^{-4}$          | 28,9           |
| RbI      | Kr  | 450—610                | $1,3 \cdot 10^6$           | 136            |
|          |     | >610                   | $1,6 \cdot 10^{-3}$        | 29,4           |
|          | He  | 420—770                | 0,082                      | 89,5           |
| CsF      | He  | 720—870                | $10^2$                     | 19,3           |
| CsCl     | He  | 620—740                | 0,1                        | 86,6           |
|          |     | 740—920                | 0,1                        | 83,5           |
|          | He  | 530—850                | 100                        | 140            |
| CsBr     | He  | 420—770                | 0,57                       | 96             |

Таблица 17.40. Параметры выражения (17.13)  
для коэффициента диффузии атомов примеси  
в полупроводниках [11]

| Полупроводник | Диффундирующее вещество | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль | Диапазон температур, К |
|---------------|-------------------------|----------------------------|----------------|------------------------|
| Ge            | Li                      | 0,0012                     | 49,2           | 900—1200               |
|               | Cu                      | 0,0033                     | 17,4           | 900—1200               |
|               | Ag                      | 0,044                      | 96,5           | 900—1200               |
|               | Au                      | 0,055                      | 242            | 1000—1200              |
|               | Zn                      | 3,3                        | 247            | 900—1200               |
|               | B                       | 0,084                      | 444            | 1000—1200              |
|               | Ga                      | 20                         | 320            | 1000—1200              |
|               | Al                      | 0,05                       | 261            | 1000—1200              |
|               | In                      | 0,048                      | 231            | 1000—1200              |
|               | Ge                      | 49                         | 209            | 1000—1200              |
|               | Sn                      | 0,017                      | 183            | 1000—1200              |
|               | Pb                      | —                          | 348            | 1000—1200              |
|               | P                       | 1,3                        | 240            | 1000—1200              |
|               | As                      | 4,5                        | 232            | 900—1200               |
|               | Sb                      | 3,6                        | 232            | 1000—1200              |
|               | Fe                      | 0,13                       | 106            | 1000—1200              |
|               | Ni                      | 0,42                       | 87             | 900—1200               |
|               | O                       | 0,17                       | 195            | 900—1200               |
|               | He                      | 0,0061                     | 68             | 900—1200               |
|               | H                       | 0,0027                     | 36,7           | 1000—1200              |
|               | Ta                      | $2,5 \cdot 10^{-6}$        | 112            | 900—1200               |
|               | Be                      | 0,5                        | 242            | 900—1200               |
|               | Co                      | 0,16                       | 106            | 900—1200               |
|               | N                       | —                          | 249            | 900—1200               |
|               | Bi                      | —                          | 234            | 900—1200               |

Продолжение табл. 17.40

| Полупроводник | Диффундирующее вещество | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль | Диапазон температур, К |
|---------------|-------------------------|----------------------------|----------------|------------------------|
| Si            | H                       | 0,0094                     | 46,3           | 1240—1480              |
|               | Li                      | 0,0025                     | 63,6           | 300—400                |
|               |                         | 0,0023                     | 62,7           | 700—1100               |
|               | Cu                      | 0,0047                     | 41,5           | 670—970                |
|               |                         | 0,4                        | 96,5           | 1100—1400              |
|               |                         | 0,002                      | 154            | 1400—1600              |
|               | Ag                      | 0,0011                     | 106            | 1100—1500              |
|               | Au                      |                            |                |                        |
|               | Na                      | 0,0016                     | 69             | 800—1100               |
|               | K                       | 0,0011                     | 72,5           | 800—1060               |
|               | Zn                      | 0,1                        | 135            | 1250—1550              |
|               | B                       | $6 \cdot 10^{-7}$          | 163            | 1000—1400              |
|               | Al                      | 4,8                        | 323            | 1400—1700              |
|               | Ga                      | 90                         | 376            | 1300—1600              |
|               | In                      | 18                         | 374            | 1300—1600              |
|               | Te                      | 16,5                       | 375            | 1300—1600              |
|               | C                       | 0,33                       | 282            | 1350—1700              |
|               | Si                      | $5,4 \cdot 10^3$           | 483            | 1400—1700              |
|               | Ge                      | $6,3 \cdot 10^5$           | 510            | 1400—1700              |
|               | P                       | 20                         | 364            | 1300—1600              |
|               | As                      | 34                         | 376            | 1300—1600              |
|               | Sb                      | 9,2                        | 380            | 1300—1600              |
|               | Bi                      | $10^3$                     | 444            | 1300—1600              |
|               | O                       | 0,21                       | 292            | 1300—1600              |
|               | S                       | 0,92                       | 212            | 1300—1600              |
|               | Cr                      | 0,01                       | 96,5           | 1200—1500              |
|               | Fe                      | 0,0062                     | 83             | 1300—1600              |
|               | He                      | 0,11                       | 121            | 1300—1600              |
| Te            | Tl                      | 320                        | 172            | 630—700                |
|               | Se                      | 260                        | 120            | 590—700                |
|               | Hg                      | $3,4 \cdot 10^{-5}$        | 78             | 640—700                |
|               | Te                      | $3,5 \cdot 10^{-4}$        | 96,5           | 600—700                |
| Se            | Fe                      | $10^{-5}$                  | 37,5           | 490                    |
|               | Zn                      | $3,8 \cdot 10^{-7}$        | 28             | 490                    |
|               | S                       | 4,9                        | 26             | 490                    |
|               | Ge                      | $9,4 \cdot 10^{-6}$        | 38,6           | 490                    |
|               | Te                      | $5,4 \cdot 10^{-6}$        | 39,6           | 490                    |
|               | Se                      | $2,8 \cdot 10^{-8}$        | 28             | 490                    |
|               | Tl                      | $1,4 \cdot 10^{-6}$        | 33,8           | 490                    |
|               | Sn                      | $4,8 \cdot 10^{-8}$        | 37,6           | 490                    |
| AlSb          | In                      | $5,2 \cdot 10^{-6}$        | 30,9           | 490                    |
|               | Al                      | —                          | 174            | —                      |
|               | Sb                      | —                          | 145            | —                      |
|               | Zn                      | 0,33                       | 186            | 930—1130               |
| InAs          | Cu                      | 0,0035                     | 34,5           | 420—770                |
|               | In                      | $6 \cdot 10^5$             | 386            | 1000—1200              |
|               | As                      | $3 \cdot 10^7$             | 432            | 1000—1200              |
|               | Cu                      | 0,036                      | 51             | 1200                   |
|               | Ag                      | $7,3 \cdot 10^{-4}$        | 25             | 730—1200               |
|               | Au                      | 0,0058                     | 62,8           | 900—1200               |
|               | Mg                      | $2 \cdot 10^{-6}$          | 113            | 900—1200               |
|               | Zn                      | 0,0037                     | 104            | 900—1200               |
|               | Cd                      | $6 \cdot 10^{-4}$          | 112            | 900—1200               |
|               | Ge                      | $3,7 \cdot 10^{-6}$        | 113            | 900—1200               |
|               | Sn                      | $1,5 \cdot 10^{-6}$        | 113            | 900—1200               |
|               | S                       | 6,8                        | 212            | 900—1200               |
|               | Se                      | 13                         | 212            | 900—1200               |
|               | Te                      | $3,4 \cdot 10^{-5}$        | 124            | 900—1200               |
|               | P                       | 130                        | 261            | 920—1170               |

| Полу-проводник | Диффундирующее вещество | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль | Диапазон температур, К |
|----------------|-------------------------|----------------------------|----------------|------------------------|
| GaSb           | Ga                      | 3200                       | 304            | 930—970                |
|                | Sb                      | 0,0087                     | 109            | 600—920                |
|                | Sb                      | 34000                      | 333            | 920—970                |
|                | Sn                      | $2,4 \cdot 10^{-5}$        | 77,4           | 600—920                |
|                | Te                      | $3,8 \cdot 10^{-4}$        | 116            | 600—920                |
|                | Cd                      | $1,5 \cdot 10^{-6}$        | 69,5           | 770—900                |
| InP            | Li                      | $2,3 \cdot 10^{-4}$        | 184            | 1070                   |
|                | In                      | $10^5$                     | 373            | 1120—1270              |
|                | P                       | $7 \cdot 10^{10}$          | 545            | 1120—1270              |
|                | Au                      | $1,3 \cdot 10^{-5}$        | 463            | 870—1100               |
|                | Ag                      | $3,6 \cdot 10^{-4}$        | 57             | 800—1200               |
|                | Cu                      | 30                         | 66,5           | 900—1200               |
| InSb           | Cd                      | $1,1 \cdot 10^{-7}$        | 70             | 1000—1200              |
|                | In                      | $2 \cdot 10^{-9}$          | 27             | 600—800                |
|                | Sb                      | $1,4 \cdot 10^{-4}$        | 363            | 600—800                |
|                | Cu                      | $3,5 \cdot 10^{-5}$        | 35,7           | 500—760                |
|                | Ag                      | $10^{-7}$                  | 24,2           | 700—800                |
|                | Au                      | $7 \cdot 10^{-4}$          | 30,9           | 400—800                |
|                | Li                      | $7 \cdot 10^{-4}$          | 27             | 770                    |
|                | Hg                      | $4 \cdot 10^{-6}$          | 113            | 700—770                |
|                | Cd                      | $10^{-5}$                  | 106            | 520—770                |
|                | Zn                      | $1,6 \cdot 10^6$           | 222            | 620—770                |
|                | Sn                      | $1,3 \cdot 10^{-6}$        | 62,7           | 570—770                |
|                | Ge                      | $5 \cdot 10^{-6}$          | 91,5           | 600—770                |
|                | S                       | $4 \cdot 10^5$             | 101            | 470—720                |
|                | Se                      | 0,016                      | 125            | 470—720                |
|                | Co                      | $2,7 \cdot 10^{11}$        | 37,7           | 770—770                |
|                | Fe                      | $10^{-7}$                  | 24,2           | 700—780                |
|                | Te                      | $6,6 \cdot 10^{-5}$        | 115            | 630—770                |
| GaP<br>GaAs    | S                       | 3200                       | 453            | 1400—1700              |
|                | Ga                      | $10^7$                     | 540            | 1400—1500              |
|                | As                      | $4 \cdot 10^4$             | 980            | 1400—1500              |
|                | Li                      | 0,53                       | 96,5           | 520—770                |
|                | Au                      | $10^{-3}$                  | 106            | 860—1330               |
|                | Mg                      | $4 \cdot 10^{-5}$          | 118            | 1070—1270              |
|                | Cd                      | 0,0013                     | 212            | 1070—1370              |
|                | Zn                      | $3 \cdot 10^{-7}$          | 96,5           | 1070—1370              |
|                | Ge                      | 7,5                        | 348            | 1320—1410              |
|                | Sn                      | $6 \cdot 10^4$             | 241            | 1300—1500              |
| CdS            | S                       | 180                        | 251            | 1100—1500              |
|                | Mn                      | 0,65                       | 240            | 1000—1300              |
|                | Te                      | $2,6 \cdot 10^{-5}$        | 193            | 1270—1370              |
|                | Cd                      | 3                          | 193            | 1000—1420              |
|                | Cd                      | $1,1 \cdot 10^{-5}$        | 60             | 670—1000               |
|                | Cu                      | 2000                       | 92,7           | 420—670                |
|                | Cu                      | 0,0015                     | 73,4           | 670—1020               |
|                | Ag                      | 0,24                       | 77,2           | 570—770                |
|                | Au                      | 200                        | 174            | 770—1070               |
|                | Li                      | $3 \cdot 10^{-6}$          | 65,6           | 880—1230               |

| Полу-проводник | Диффундирующее вещество | $D_0$ , см <sup>2</sup> /с | $Q$ , кДж/моль | Диапазон температур, К |
|----------------|-------------------------|----------------------------|----------------|------------------------|
| CdSe           | Se                      | $1,3 \cdot 10^5$           | 42,8           | 1220—1700              |
|                | P                       | —                          | 203            | 1070—1270              |
| CdTe           | Se                      | $1,7 \cdot 10^{-4}$        | 130            | 950—1200               |
|                | In                      | 0,041                      | 154            | 720—1300               |
|                | Au                      | 67                         | 193            | 600—1000               |
|                | Cu                      | $3,7 \cdot 10^{-4}$        | 64,7           | 370—570                |
| ZnS            | Zn                      | $3 \cdot 10^{-4}$          | 147            | 1170—1200              |
|                | Zn                      | $1,5 \cdot 10^{-4}$        | 314            | 1210—1300              |
|                | S                       | —                          | 328            | 970—1160               |
| ZnSe           | Zn                      | 1000                       | 332            | 1000—1100              |
|                | Cu                      | $1,7 \cdot 10^{-5}$        | 64             | 470—840                |
| ZnTe           | Zn                      | 0,01                       | 183            | 1060—1220              |
|                | Te                      | $2 \cdot 10^{-4}$          | 367            | 1000—1270              |
| HgTe           | Cd                      | $3,1 \cdot 10^{-4}$        | 66,7           | 520—620                |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

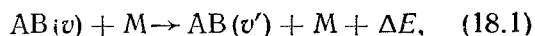
1. Справочник химика. М.: Химия. 1964. Т. 3.
2. Marggero T. A., Mason E. A.//J. Phys. Chem. R Data. 1972. Vol. 1. P. 3—76.
3. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованной плазме. М.: Атомиздат. 1975.
4. Крюков Н. А. Взаимодействие атомов ртути с атомами инертных газов. Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГУ, 1984.
5. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Пер. с англ. Л.: Химия. 1971.
6. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Пер. с англ. Л.: Химия. 1982.
7. Бретшнейдер С. Свойства газов и жидкостей: Пер. с польск. М.: Химия. 1986.
8. Adda Y., Philibert J. La diffusion dans les solides. Paris: Press Universitaires de France, 1966. Vol. 2.
9. Алефельд Г. Фёлькль И.//Водород в металлах/Под ред. Г. Алефельда и И. Фёлькля: Пер. с англ. М.: Мир. 1981.
10. Warburton W. K., Turnbull D.//Diffusion in Solids. Amsterdam: North Holland. 1975.
11. Болтакс Б. И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л.: Наука. 1972.

# ГЛАВА 18 ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ

А. В. Елецкий

## 18.1. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ МОЛЕКУЛ В ГАЗАХ

Процесс, в результате которого энергия молекулярных колебаний превращается в энергию поступательного движения частиц, описывается формулой



где АВ — молекула;  $v, v'$  — колебательные квантовые числа; М — частица газа (атом, молекула),  $\Delta E$  — энергия, выделяющаяся в виде поступательного движения сталкивающихся частиц. При колебательной релаксации наиболее эффективно протекают процессы, сопровождающиеся изменением колебательного квантового числа на единицу ( $v-v'=1$ )<sup>[1]</sup>. Именно такие процессы наиболее подробно изучены экспериментально. В табл. 18.1 представлены значения константы  $k$  скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, которые измерены при различных температурах для молекул, находящихся в первом колебательно-возбужденном состоянии ( $v=1, v'=0$ ). Погрешность приведенных данных составляет не-

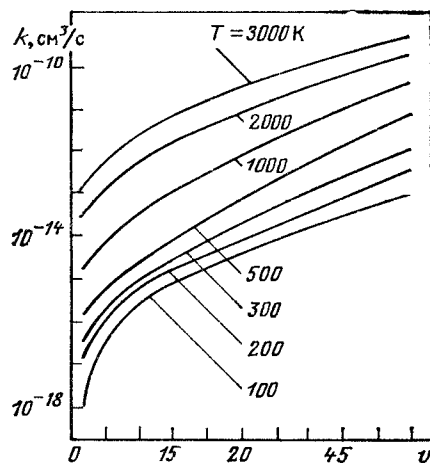


Рис. 18.1. Зависимость константы скорости колебательной релаксации молекулы СО при столкновении с атомом Не от колебательного квантового числа молекулы СО  $(v) + \text{He} \rightarrow \text{CO}(v-1) + \text{He} + \Delta E$  [3]

сколько сотен процентов. В табл. 18.2, 18.3 приведены значения константы скорости колебательной релаксации молекул при различных температурах и значениях колебательного квантового числа  $v$ . Параметры процессов колебательной релаксации и обмена колебательными квантами молекулы СО приведены на рис. 18.1 и 18.2.

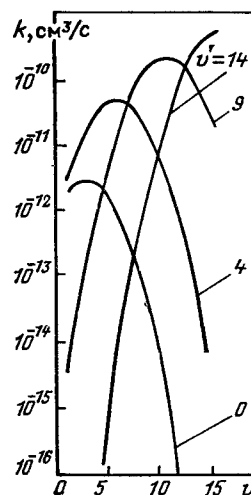


Рис. 18.2. Зависимость константы скорости обмена колебательными квантами при столкновении между молекулами СО  $[\text{CO}(v) + \text{CO}(v') \rightarrow \text{CO}(v-1) + \text{CO}(v'+1)]$  от колебательного квантового числа  $v$  молекулы (Т=300 К) [3]

Таблица 18.1. Константа скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, находящихся в первом колебательно-возбужденном состоянии,  $k, 10^{-16} \text{ см}^3/\text{с}$  [1, 2]

| Молекула<br>АВ | Примесь<br>М                  | Температура, К |      |                       |
|----------------|-------------------------------|----------------|------|-----------------------|
|                |                               | 300            | 800  | 2000                  |
| H <sub>2</sub> | H <sub>2</sub>                | 0,8            | —    | —                     |
| D <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> * <sup>1</sup> | 0,3 [5]        | —    | —                     |
| HD             | HD                            | 1,3            | —    | —                     |
| N <sub>2</sub> | N <sub>2</sub>                | —              | 0,56 | 14                    |
| CO             | CO                            | 0,18           | —    | 97                    |
| NO             | NO                            | 640            | —    | 4,7 · 10 <sup>5</sup> |
| O <sub>2</sub> | O <sub>2</sub>                | 0,06           | 11   | 260                   |

| Молекула<br>AB  | Примесь<br>M    | Температура, К      |                     |                     |
|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                 |                 | 300                 | 800                 | 2000                |
| F <sub>2</sub>  | F <sub>2</sub>  | 18                  | —                   | —                   |
| Cl <sub>2</sub> | Cl <sub>2</sub> | 89                  | 3500                | —                   |
| Br <sub>2</sub> | Br <sub>2</sub> | 1150                | —                   | —                   |
| HF              | HF              | 1,7·10 <sup>4</sup> | 10 <sup>4</sup>     | 8,2·10 <sup>3</sup> |
| HCl             | HCl             | 180                 | 1000                | 10 <sup>4</sup>     |
| HBr             | HBr             | 170                 | 800                 | 10 <sup>4</sup>     |
| HI              | HI              | —                   | 1000                | 10 <sup>4</sup>     |
| DF              | DF              | 1,1·10 <sup>4</sup> | 5100                | 8600                |
| DCI             | DCI             | 63                  | —                   | —                   |
| CS              | CS              | 3400                | —                   | —                   |
| D <sub>2</sub>  | H <sub>2</sub>  | 2,7                 | —                   | —                   |
|                 | HD              | 1,4                 | —                   | —                   |
|                 | DF              | 8300                | —                   | —                   |
| HF              | He              | —                   | —                   | 1300                |
|                 | Ar              | —                   | —                   | 250                 |
|                 | F               | 10 <sup>6</sup>     | —                   | 4,2·10 <sup>5</sup> |
|                 | H <sub>2</sub>  | 6800                | —                   | 500                 |
|                 | D <sub>2</sub>  | 1050                | 2600                | —                   |
|                 | N <sub>2</sub>  | 36                  | 1200                | —                   |
|                 | DF              | 1,8·10 <sup>4</sup> | 1,2·10 <sup>4</sup> | 10 <sup>4</sup>     |
|                 | H               | 3,6·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
| HCl             | H <sub>2</sub>  | 55                  | 900                 | 8000                |
|                 | Ar              | 0,03                | —                   | —                   |
|                 | D <sub>2</sub>  | 4,4                 | —                   | —                   |
|                 | HD              | 23                  | —                   | —                   |
|                 | Br              | 2600                | —                   | —                   |
|                 | Cl              | 7·10 <sup>4</sup>   | —                   | —                   |
|                 | He              | 5,5·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | Ne              | 4,4·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | Kr              | 4,2·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | H               | 7,7·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | D               | 1,1·10 <sup>5</sup> | —                   | —                   |
|                 | Cl <sub>2</sub> | 55                  | —                   | —                   |
| HBr             | He              | 4,5·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | HD              | 80                  | —                   | —                   |
|                 | Ne              | 4,8·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | DF              | 2800                | —                   | —                   |
|                 | Kr              | 4,7·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | Br              | 2,6·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | H <sub>2</sub>  | 100                 | —                   | —                   |
|                 | D <sub>2</sub>  | 110                 | —                   | —                   |
| DF              | Ar              | —                   | —                   | 120                 |
|                 | N <sub>2</sub>  | 230                 | —                   | 1200                |
|                 | H <sub>2</sub>  | 180                 | 1200                | 8200                |
|                 | HF              | 10 <sup>4</sup>     | —                   | 1,7·10 <sup>5</sup> |
|                 | D <sub>2</sub>  | 6400                | —                   | —                   |
| DCI             | He              | 0,62                | —                   | —                   |
|                 | Cl              | 5,5·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | H <sub>2</sub>  | 190                 | —                   | —                   |
|                 | HD              | 780                 | —                   | —                   |
|                 | Br              | 2300                | —                   | —                   |
|                 | D <sub>2</sub>  | 17                  | —                   | —                   |
|                 | H               | 1,8·10 <sup>4</sup> | —                   | —                   |
|                 | D               | 2·10 <sup>4</sup>   | —                   | —                   |

| Молекула<br>AB              | Примесь<br>M                  | Температура, К          |         |                     |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------|---------------------|
|                             |                               | 300                     | 800     | 2000                |
| H <sub>2</sub>              | HF                            | 8300                    | —       | —                   |
|                             | He* <sup>2</sup>              | 0,2                     | 3       | 2000                |
|                             | Ar                            | 0,1                     | —       | —                   |
|                             | D <sub>2</sub>                | 0,24                    | —       | —                   |
| CO                          | He                            | 0,27 [5]                | 2,1 [5] | 300 [5]             |
|                             | H                             | —                       | —       | 2,7·10 <sup>6</sup> |
|                             | Ne                            | 0,009                   | —       | 5,3                 |
|                             | H <sub>2</sub> * <sup>3</sup> | 4,0 [4]                 | —       | —                   |
|                             | HD                            | 1,9 [5]                 | —       | —                   |
|                             | D <sub>2</sub>                | 0,12 [5]                | —       | —                   |
|                             | O <sub>2</sub>                | 0,4                     | —       | —                   |
|                             | O                             | 3600                    | 5800    | 5·10 <sup>4</sup>   |
| NO                          | Ar                            | 85                      | —       | —                   |
|                             | CO                            | 340                     | —       | —                   |
|                             | N <sub>2</sub>                | 10,3                    | —       | —                   |
|                             | He                            | 2600                    | —       | —                   |
| Cl <sub>2</sub>             | He                            | 10 <sup>4</sup>         | —       | —                   |
|                             | H <sub>2</sub>                | 1,9·10 <sup>4</sup>     | —       | —                   |
|                             | N <sub>2</sub>                | 70                      | —       | —                   |
| N <sub>2</sub>              | O                             | 45                      | 360     | 2500                |
|                             | He                            | 14                      | —       | —                   |
|                             | H <sub>2</sub>                | 150                     | —       | —                   |
|                             | D <sub>2</sub>                | 12                      | —       | —                   |
| D <sub>2</sub>              | He                            | 0,07                    | —       | —                   |
|                             | H <sub>2</sub>                | 2,8                     | —       | —                   |
| O <sub>2</sub> <sup>+</sup> | He                            | <20 [6]                 | —       | —                   |
|                             | Ne                            | <130 [6]                | —       | —                   |
|                             | Ar                            | 10 <sup>4</sup> [6]     | —       | —                   |
|                             | Kr                            | 1,1·10 <sup>5</sup> [6] | —       | —                   |
|                             | H <sub>2</sub>                | 2,5·10 <sup>4</sup> [6] | —       | —                   |
|                             | D <sub>2</sub>                | 6500 [6]                | —       | —                   |
|                             | N <sub>2</sub>                | 1,9·10 <sup>4</sup> [6] | —       | —                   |
|                             | CO                            | 4,4·10 <sup>5</sup> [6] | —       | —                   |
|                             | O <sub>2</sub>                | 3·10 <sup>6</sup> [6]   | —       | —                   |

\*<sup>1</sup>  $k = 0,011 \cdot 10^{-16}$  см<sup>3</sup>/с при 77 К [5].\*<sup>2</sup>  $k = 0,017 \cdot 10^{-16}$  см<sup>3</sup>/с при 77 К [1,2].\*<sup>3</sup>  $k = 0,18 \cdot 10^{-16}$  см<sup>3</sup>/с при 77 К [4].Таблица 18.2. Константа скорости колебательной релаксации молекул HF (DF) при столкновении с невозбужденными молекулами HF (DF)  $k$ , 10<sup>-12</sup> см<sup>3</sup>/с [9, 10]

| $v$                                   | T, К |     |      |      |      |
|---------------------------------------|------|-----|------|------|------|
|                                       | 300  | 500 | 1000 | 1800 | 2400 |
| HF (v) + HF (0) → HF (v - 1) + HF (0) |      |     |      |      |      |
| 1                                     | 1,5  | 1,2 | 0,88 | 0,57 | 0,88 |
| 2                                     | 7,4  | 6,2 | 4,6  | 2,9  | 4,6  |
| 3                                     | 16   | 13  | 8,8  | 5,6  | 8,8  |
| 4                                     | 23   | 21  | 15   | 9,4  | 14   |
| 5                                     | 34   | 28  | 20   | 12   | 19   |
| 6                                     | 41   | 32  | 24   | 14   | 24   |

Продолжение табл. 18.2

| $v$                                         | $T, K$ |      |      |      |      |
|---------------------------------------------|--------|------|------|------|------|
|                                             | 300    | 500  | 1000 | 1800 | 2400 |
| $DF(v) + DF(0) \rightarrow DF(v-1) + DF(0)$ |        |      |      |      |      |
| 1                                           | 1,0    | 0,56 | 0,42 | 0,74 | 1,34 |
| 2                                           | 4,4    | 2,3  | 1,9  | 3,2  | 5,4  |
| 3                                           | 9,3    | 4,8  | 4,1  | 6,7  | 11   |
| 4                                           | 13     | 7,7  | 6,2  | 10   | 17   |
| 5                                           | 18     | 10,3 | 7,5  | 13   | 21   |
| 6                                           | 21     | 12   | 8,8  | 15   | 27   |
| $DF(v) + HF(0) \rightarrow DF(v-1) + HF(0)$ |        |      |      |      |      |
| 1                                           | 1,1    | 0,73 | 0,72 | 0,52 | 0,63 |
| 2                                           | 4,5    | 3,1  | 2,5  | 2,2  | 3,0  |
| 3                                           | 11     | 7,3  | 4,9  | 4,4  | 6,1  |
| 4                                           | 16     | 11   | 7,3  | 8    | 9,3  |
| 5                                           | 22     | 16   | 11   | 10   | 12   |
| 6                                           | 25     | 18   | 14   | 12   | 13   |
| $HF(v) + DF(0) \rightarrow HF(v-1) + DF(0)$ |        |      |      |      |      |
| 1                                           | 1,8    | 1,4  | 0,95 | 0,97 | 1,0  |
| 2                                           | 8,3    | 6,9  | 4,6  | 4,4  | 4,5  |
| 3                                           | 18     | 14   | 9,4  | 9,6  | 10   |
| 4                                           | 30     | 24   | 15   | 14   | 16   |
| 5                                           | 41     | 31   | 21   | 20   | 21   |
| 6                                           | 53     | 37   | 25   | 22   | 22   |

Таблица 18.3. Константа скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, находящихся в различных колебательно-возбужденных состояниях  $k, 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$  ( $T = 300 \text{ K}$ ) [1, 2]

| Молекула АВ | Примесь М         | $v$    |        |       |       |      |      |      |
|-------------|-------------------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|
|             |                   | 1      | 2      | 3     | 4     | 5    | 6    | 7    |
| HCl         | H <sup>[7]</sup>  | 50     | 85     | 110   | —     | —    | 130  | —    |
|             | Cl <sup>[7]</sup> | 8,3    | 14,2   | 18,3  | —     | —    | 70   | —    |
|             | Br <sup>[8]</sup> | 0,28   | 1,4    | —     | —     | —    | —    | —    |
| HF          | H <sub>2</sub>    | 0,0044 | 0,0088 | 0,014 | 0,019 | —    | —    | —    |
|             | O <sub>2</sub>    | 0,0011 | 0,0074 | 0,02  | 0,05  | 0,14 | 0,34 | 0,5  |
|             | N <sub>2</sub>    | 0,0046 | 0,026  | 0,08  | 0,14  | 0,57 | 1,7  | 3,7  |
|             | D <sub>2</sub>    | 0,09   | 0,57   | 1,4   | 3     | 5,7  | 8    | 12   |
|             | CO <sub>2</sub>   | 1,1    | 5,7    | 10    | 20    | 30   | 43   | 43   |
|             | H <sub>2</sub>    | 0,68   | 0,21   | 0,15  | 0,21  | 0,49 | 0,99 | 0,16 |
| DF          | H <sub>2</sub>    | 0,18   | 0,06   | 0,14  | 0,29  | —    | —    | —    |
|             | N <sub>2</sub>    | 0,023  | 0,074  | 0,17  | 0,3   | —    | —    | —    |

18.2. РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ  
НА АТОМАХ И МОЛЕКУЛАХТаблица 18.4. Транспортное сечение рассеяния электронов на атомах и молекулах,  $10^{-16} \text{ см}^2$  [27]

| Энергия электрона, эВ | He  | Ne   | Ar   | Kr   | Xe  | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | CO   | H <sub>2</sub> O |
|-----------------------|-----|------|------|------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------|------------------|
| 0,01                  | 5,2 | —    | 5,7  | 25   | 120 | 7,3            | 2,2            | 7,3            | 3,0            | 170             | 7,8  | 4000             |
| 0,02                  | 5,4 | —    | 4,0  | 20   | 80  | 8,0            | 2,9            | 8,0            | 3,0            | 120             | 5,9  | 1700             |
| 0,04                  | 5,5 | 0,50 | 2,4  | 14   | 50  | 9,0            | 3,9            | 9,0            | 3,0            | 85              | 5,2  | 790              |
| 0,06                  | 5,7 | 0,57 | 1,5  | 10   | 37  | 9,6            | 4,6            | 9,6            | 3,0            | —               | 6,0  | 500              |
| 0,08                  | 5,8 | 0,64 | 0,8  | 8    | 28  | 10,1           | 5,2            | 10,1           | 3,4            | —               | —    | 350              |
| 0,1                   | 5,9 | 0,70 | 0,4  | 6,9  | 21  | 10,5           | 6,0            | 10,6           | 4,4            | 52              | 7,3  | —                |
| 0,20                  | 6,2 | 0,93 | 0,17 | 3,0  | 8,2 | 12,0           | 8,3            | 12             | 4,9            | 34              | 10,0 | —                |
| 0,30                  | 6,4 | 1,09 | 0,16 | 1,0  | 4,0 | 13,0           | 9,6            | 14             | 4,6            | 18              | 12   | —                |
| 0,40                  | 6,5 | 1,22 | 0,18 | 0,6  | 1,9 | 13,9           | 10             | 14,5           | 4,7            | —               | 13,5 | —                |
| 0,50                  | 6,6 | 1,32 | 0,22 | 0,56 | 1,4 | 14,7           | 10             | 15             | 5,1            | 7,3             | 14   | —                |
| 0,60                  | 6,7 | 1,40 | 0,4  | 0,52 | 1,3 | 15,6           | 10             | 16             | 5,5            | 5,7             | 15   | —                |
| 0,70                  | 6,7 | 1,47 | 0,54 | 0,54 | 1,4 | 16,3           | 10             | 17             | 6,1            | 5,0             | 15,5 | —                |
| 0,80                  | 6,8 | 1,53 | 0,77 | 0,56 | 1,5 | 17             | 10             | 17,5           | 6,8            | —               | 16   | —                |
| 1,0                   | 6,8 | 1,62 | 1,0  | 0,60 | 2,1 | 18             | 10,5           | 18             | 7,6            | 4,1             | 17,0 | —                |
| 2,0                   | 7,0 | 1,82 | 2,6  | 2,0  | 8,0 | 18,0           | 20             | —              | 7,1            | 4,8             | —    | —                |
| 2,5                   | 7,0 | 1,86 | —    | —    | —   | 17             | 32             | —              | 6,3            | 6,4             | —    | —                |
| 3,0                   | 6,9 | 1,91 | 4,0  | 4,0  | 15  | 16             | 30             | —              | 5,6            | 10,4            | —    | —                |
| 4,0                   | 6,6 | 1,98 | 5,9  | 7,0  | 23  | 14             | 13             | —              | 5,2            | 17,1            | —    | —                |
| 5,0                   | 6,3 | 2,07 | 7,9  | 10,0 | 32  | 13             | 11             | —              | 5,4            | 14              | —    | —                |
| 6,0                   | 6,0 | 2,14 | 9,0  | 13   | 34  | —              | 10             | —              | 5,8            | —               | —    | —                |
| 7,0                   | —   | 2,21 | 10,6 | 16   | 35  | —              | 9,7            | —              | —              | —               | —    | —                |
| 8,0                   | —   | —    | 11   | 18   | 35  | —              | 9,6            | —              | 7,2            | 11,7            | —    | —                |
| 9,0                   | —   | —    | 12   | 19   | 33  | —              | 9,5            | —              | —              | —               | —    | —                |
| 10                    | —   | —    | 14   | 21   | 32  | —              | 9,8            | —              | 8,4            | 12,9            | —    | —                |
| 15                    | —   | —    | 12   | 22   | 30  | —              | 11             | —              | 9,4            | —               | —    | —                |
| 20                    | —   | —    | 10   | 19   | 22  | —              | 13             | —              | 9,1            | —               | —    | —                |



Таблица 18.5. Сечения пеннинговского процесса  $A^+ + B \rightarrow A + B^+ + e$  при тепловой энергии,  $10^{-16} \text{ см}^2$  (данные являются результатом усреднения по многочисленным измерениям, погрешность данных 50 — 100%) [11, 13]

| В                | He     |        |        |        | Ne     |        |        |        | Ar     |        |        |        | Kr     |        |        |        |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | $2^3S$ | $2^1S$ | $2^1P$ | $3^1P$ | $3P_2$ | $1P_1$ | $3P_0$ | $3P_1$ | $3P_2$ | $1P_1$ | $3P_0$ | $3P_1$ | $3P_2$ | $1P_1$ | $3P_0$ | $3P_1$ |
| H                | 22     | 33     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Ar               | 7      | 25     | 86     | 56     | 3,1    | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Kr               | 8,8    | 34     | 89     | 50     | 1      | —      | —      | —      | 1      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Xe               | 12     | 40     | 84     | 73     | 12     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Hg               | 270    | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 30     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| He( $2^3S$ )     | 100    | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Na               | 14     | 17     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Zn               | 36     | —      | —      | —      | 42     | —      | —      | —      | 53     | —      | —      | —      | 93     | —      | —      | —      |
| Cd               | 72     | —      | —      | —      | 46     | —      | —      | —      | 65     | —      | —      | —      | 110    | —      | —      | —      |
| H <sub>2</sub>   | 2,3    | 2,7    | 26     | —      | 2      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| N <sub>2</sub>   | 5,3    | 11     | 69     | —      | 6      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| O <sub>2</sub>   | 14     | 25     | 69     | —      | 1,7    | 4      | 2,8    | 2,8    | 1,2    | 1,8    | 1,8    | 1,6    | 1,9    | 1,6    | 1,8    | 2,2    |
| CO               | 8      | 16     | —      | —      | 7      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| NO               | 17     | 36     | —      | —      | 21     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| CO <sub>2</sub>  | 51     | 70     | —      | —      | 11     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| SF <sub>6</sub>  | 28     | 53     | —      | —      | 38     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Ne               | —      | —      | —      | 40     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Cs               | 6,5    | 22     | —      | —      | —      | —      | 400    | 400    | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| N <sub>2</sub> O | 36     | 38     | —      | —      | 25     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| K                | 70     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Li               | 32     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Rb               | 35     | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |

Таблица 18.6. Среднее сечение (усреднено по состояниям тонкой структуры) и константа скорости ассоциативной ионизации при столкновении с участием возбужденных атомов  $A^* + B \rightarrow AB^+ + e$  [11, 13]

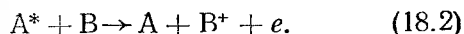
Продолжение табл. 18.6

| A*             | B             | T, К | Константа скорости, $10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ | Среднее сечение, $10^{-16} \text{ см}^2$ |
|----------------|---------------|------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Li ( $2^2P$ )  | Li ( $2^2P$ ) | 900  | —                                                    | 0,005                                    |
| Na ( $3^2P$ )  | Na ( $3^2P$ ) | 500  | 380                                                  | 3,8                                      |
| K ( $4^2P$ )   | K ( $4^2P$ )  | 500  | 9                                                    | 0,13                                     |
| Rb ( $5^2P$ )  | Rb ( $5^2P$ ) | 470  | 3,2                                                  | 0,7                                      |
| Cs ( $6^2P$ )  | Cs ( $6^2P$ ) | 425  | 2                                                    | 0,54                                     |
| He ( $3^3S$ )  | He            | 320  | —                                                    | 0,07                                     |
| He ( $3^3P$ )  | He            | 320  | —                                                    | 1,7                                      |
| He ( $3^3D$ )  | He            | 320  | —                                                    | 3,2                                      |
| He ( $3^1P$ )  | He            | 320  | —                                                    | 2,1                                      |
| He ( $3^1D$ )  | He            | 320  | —                                                    | 17                                       |
| Rb ( $6^2P$ )  | Rb            | 475  | 16 000                                               | —                                        |
| Rb ( $8^2P$ )  | Rb            | 520  | 3000                                                 | —                                        |
| Rb ( $9^2P$ )  | Rb            | 520  | 6600                                                 | —                                        |
| Rb ( $10^2P$ ) | Rb            | 520  | 9400                                                 | —                                        |

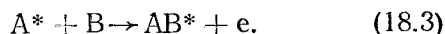
| A*              | B              | T, К | Константа скорости, $10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ | Среднее сечение, $10^{-16} \text{ см}^2$ |
|-----------------|----------------|------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Cs ( $7^2P$ )   | Cs             | 425  | 1100                                                 | —                                        |
| Cs ( $8^2P$ )   | Cs             | 470  | 13                                                   | —                                        |
| Cs ( $9^2P$ )   | Cs             | 500  | 4600                                                 | —                                        |
| Cs ( $10^2P$ )  | Cs             | 500  | 6800                                                 | —                                        |
| K ( $6^2P$ )    | K              | 570  | 3000                                                 | —                                        |
| K ( $7^2P$ )    | K              | 570  | 45 000                                               | —                                        |
| K ( $8^2P$ )    | K              | 570  | 74 000                                               | —                                        |
| K ( $9^2P$ )    | K              | 570  | 75 000                                               | —                                        |
| U               | O              | 2000 | —                                                    | 16,2                                     |
| U               | O <sub>2</sub> | 2000 | —                                                    | 0,17                                     |
| U               | O <sub>3</sub> | 2000 | —                                                    | 4                                        |
| Th              | O              | 2000 | —                                                    | 10,3                                     |
| Th              | O <sub>2</sub> | 2000 | —                                                    | 0,15                                     |
| Th              | O <sub>3</sub> | 2000 | —                                                    | 2000                                     |
| Hg ( $6^3P_0$ ) | Hg             | 400  | —                                                    | 460                                      |

### 18.3. ПРОЦЕССЫ ИОНИЗАЦИИ С УЧАСТИЕМ ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ

При столкновении возбужденного атома с другим атомом или молекулой (как возбужденной, так и невозбужденной) возможны процессы двух типов, приводящие к ионизации [13, 14]. В процессе первого типа, носящем название пеннинговской ионизации, ионизация может происходить при условии, когда энергия возбуждения атома  $A^*$  превышает потенциал ионизации другого атома или молекулы  $B$ :



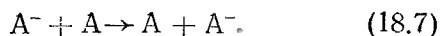
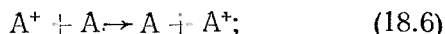
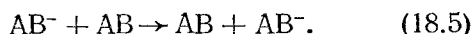
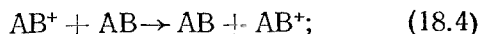
В процессе второго типа, который называется ассоциативной ионизацией, часть энергии, необходимая для отрыва электрона, выделяется в результате образования молекулярного иона:



В случае, если энергия связи молекулярного иона  $AB^+$  превышает потенциал ионизации молекулы  $AB$ , процесс ассоциативной ионизации может протекать и при участии невозбужденных частиц. Подобная ситуация имеет место в случае ассоциативной ионизации при столкновении атомов  $V$  и  $Th$  с атомами и молекулами кислорода. Приводимые в табл. 18.5 и 18.6 значения сечений и констант скорости пеннинговской и ассоциативной ионизации характеризуются погрешностью несколько десятков процентов.

### 18.4. ПРОЦЕССЫ РЕЗОНАНСНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ

К этим процессам относятся



Основным источником информации о параметрах этих процессов является расчет на основании асимптотической теории [17], погрешность которой 10—30% существенно ниже погрешности современного эксперимента. В табл. 18.7—18.9 приведены сечения процессов (18.4)—(18.7) при различной энергии столкновения [20].

Таблица 18.8. Сечение резонансией перезарядки иона на собственном атоме,  $10^{-16}$  см<sup>2</sup> [20]

| Атом | Энергия столкновения, эВ |      |      |      |      |        |
|------|--------------------------|------|------|------|------|--------|
|      | 0,1                      | 1    | 10   | 100  | 1000 | 10 000 |
| H    | 67,1                     | 49,2 | 36,7 | 26,2 | 17,2 | 9,5    |
| He   | 37,1                     | 27,4 | 20,8 | 15,3 | 10,6 | 6,6    |
| Li   | 313                      | 228  | 180  | 140  | 103  | 70,8   |
| Be   | 150                      | 108  | 83,6 | 63,9 | 46,6 | 31,4   |
| B    | 120                      | 83,2 | 62,0 | 45,0 | 30,5 | 18,4   |
| C    | 95,6                     | 58,7 | 40,7 | 28,2 | 18,3 | 10,5   |
| N    | 60,5                     | 39,5 | 28,5 | 20,4 | 13,7 | 8,1    |
| O    | 60,2                     | 41,3 | 30,3 | 21,6 | 14,4 | 8,4    |
| F    | 54,7                     | 33,5 | 23,2 | 16,0 | 10,5 | 6,1    |
| Ne   | 38,3                     | 25,7 | 18,9 | 13,7 | 9,4  | 5,9    |
| Na   | 350                      | 264  | 212  | 168  | 128  | 92,0   |
| Mg   | 211                      | 155  | 123  | 96,0 | 72,4 | 51,2   |
| Al   | 204                      | 147  | 113  | 84,7 | 60,2 | 38,9   |
| Si   | 169                      | 106  | 76,1 | 55,0 | 37,9 | 23,7   |
| P    | 110                      | 75,3 | 57,1 | 43,0 | 31,0 | 20,8   |
| S    | 99,3                     | 66,0 | 48,7 | 55,6 | 24,5 | 15,3   |
| Cl   | 100                      | 54,1 | 42,9 | 31,0 | 21,5 | 13,8   |
| Ar   | 71,9                     | 44,2 | 36,6 | 27,7 | 20,2 | 13,8   |
| K    | 457                      | 347  | 282  | 225  | 174  | 127    |
| Ca   | 301                      | 218  | 174  | 138  | 105  | 76     |
| Sc   | 281                      | 206  | 165  | 131  | 101  | 74     |
| Ti   | 273                      | 196  | 157  | 124  | 96   | 70     |
| V    | 279                      | 208  | 168  | 135  | 105  | 78     |
| Cr   | 239                      | 181  | 144  | 114  | 86   | 61     |
| Mn   | 241                      | 177  | 142  | 114  | 88   | 64     |
| Fe   | 223                      | 163  | 130  | 104  | 80   | 59     |
| Co   | 227                      | 171  | 139  | 112  | 87   | 65     |
| Ni   | 235                      | 182  | 148  | 120  | 94   | 70     |
| Cu   | 207                      | 161  | 130  | 104  | 79   | 58     |
| Zn   | 174                      | 128  | 102  | 81   | 62   | 45     |
| Ga   | 189                      | 154  | 123  | 94   | 67   | 46     |
| Ge   | 145                      | 118  | 94   | 72   | 52   | 36     |
| As   | 105                      | 86   | 69   | 53   | 39   | 27     |
| Se   | 105                      | 86   | 68   | 53   | 39   | 27     |
| Br   | 128                      | 78   | 56   | 41   | 30   | 20     |
| Kr   | 90                       | 62   | 48   | 37   | 28   | 18     |
| Rb   | 500                      | 386  | 316  | 256  | 201  | 150    |
| Sr   | 326                      | 253  | 206  | 166  | 129  | 96     |
| V    | 255                      | 214  | 177  | 142  | 111  | 82     |
| Zr   | 235                      | 198  | 164  | 132  | 103  | 76     |
| Nb   | 218                      | 182  | 149  | 119  | 91   | 66     |
| Mo   | 210                      | 176  | 144  | 114  | 88   | 64     |
| Tc   | 221                      | 186  | 154  | 124  | 97   | 72     |
| Ru   | 198                      | 166  | 135  | 107  | 82   | 59     |
| Rh   | 195                      | 163  | 133  | 105  | 80   | 58     |
| Pd   | 50                       | 37   | 25   | 17,1 | 10,2 | 5,8    |
| Ag   | 224                      | 170  | 137  | 109  | 84   | 61     |
| Cd   | 191                      | 141  | 113  | 90   | 70   | 51     |
| In   | 208                      | 171  | 137  | 107  | 79   | 55     |
| Sn   | 158                      | 129  | 102  | 78   | 57   | 39     |
| Sb   | 137                      | 114  | 92   | 72   | 55   | 40     |
| Te   | 128                      | 106  | 85   | 67   | 51   | 36     |
| I    | 146                      | 97   | 73   | 56   | 41   | 29     |
| Xe   | 116                      | 82   | 64   | 51   | 39   | 28     |
| Cs   | 548                      | 427  | 359  | 292  | 231  | 174    |
| Ba   | 400                      | 296  | 240  | 194  | 152  | 114    |
| La   | 328                      | 278  | 233  | 191  | 152  | 116    |
| Ce   | 218                      | 182  | 149  | 118  | 91   | 66     |
| Pr   | 352                      | 299  | 249  | 202  | 160  | 120    |
| Nd   | 244                      | 204  | 167  | 133  | 102  | 74     |
| Pm   | 244                      | 204  | 168  | 133  | 102  | 74     |
| Sm   | 362                      | 307  | 256  | 209  | 165  | 125    |
| Eu   | 297                      | 250  | 207  | 167  | 130  | 97     |

Таблица 18.7. Сечение резонансной перезарядки положительных и отрицательных молекулярных ионов на молекулах того же сорта,  $10^{-16}$  см<sup>2</sup> [20]

| Ион                         | Энергия столкновения, эВ |     |     |     |      |        |
|-----------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|--------|
|                             | 0,1                      | 1,0 | 10  | 100 | 1000 | 10 000 |
| H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —                        | 25  | 17  | 7   | 7    | 6      |
| N <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 66                       | 52  | 38  | 32  | 23   | —      |
| O <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 50                       | 36  | 25  | 18  | 14   | —      |
| CO <sup>+</sup>             | 82                       | 67  | 52  | 39  | 29   | —      |
| NO <sup>+</sup>             | 49                       | 37  | 25  | 17  | 5,5  | —      |
| O <sub>2</sub> <sup>-</sup> | 13                       | 7   | 5,5 | 4,7 | 2,2  | —      |

Продолжение табл. 18.8

| Атом | Энергия столкновения, эВ |     |     |     |      |        |
|------|--------------------------|-----|-----|-----|------|--------|
|      | 0,1                      | 1   | 10  | 100 | 1000 | 10 000 |
| Gd   | 264                      | 222 | 184 | 148 | 115  | 85     |
| Tb   | 218                      | 182 | 149 | 118 | 90   | 64     |
| Dy   | 214                      | 179 | 146 | 115 | 87   | 62     |
| Ho   | 210                      | 174 | 142 | 112 | 85   | 61     |
| Er   | 210                      | 174 | 141 | 112 | 85   | 60     |
| Tu   | 208                      | 174 | 141 | 111 | 84   | 60     |
| Yb   | 250                      | 210 | 172 | 137 | 105  | 76     |
| Hf   | 247                      | 210 | 175 | 143 | 113  | 86     |
| Ta   | 208                      | 176 | 146 | 118 | 93   | 70     |
| W    | 241                      | 174 | 140 | 115 | 89   | 66     |
| Re   | 226                      | 192 | 160 | 130 | 103  | 78     |
| Os   | 179                      | 151 | 125 | 101 | 79   | 59     |
| Ir   | 172                      | 145 | 120 | 97  | 78   | 57     |
| Pt   | 158                      | 132 | 108 | 86  | 66   | 48     |
| Au   | 158                      | 132 | 109 | 87  | 67   | 49     |
| Hg   | 158                      | 120 | 97  | 78  | 60   | 45     |
| Tl   | 204                      | 169 | 137 | 107 | 80   | 57     |
| Pb   | 218                      | 148 | 112 | 86  | 64   | 44     |
| Bi   | 186                      | 155 | 128 | 102 | 79   | 59     |
| Po   | 117                      | 95  | 75  | 57  | 41   | 28     |
| Ac   | 348                      | 297 | 249 | 205 | 164  | 127    |
| Th   | 282                      | 239 | 199 | 162 | 128  | 97     |
| Pa   | 314                      | 266 | 222 | 181 | 143  | 108    |
| U    | 295                      | 221 | 209 | 171 | 136  | 104    |
| Np   | 455                      | 391 | 330 | 273 | 221  | 172    |
| Pu   | 376                      | 320 | 269 | 220 | 176  | 135    |
| Am   | 488                      | 422 | 357 | 297 | 241  | 190    |
| Cm   | 456                      | 392 | 333 | 277 | 225  | 177    |
| Bk   | 477                      | 410 | 347 | 288 | 234  | 183    |
| No   | 438                      | 375 | 316 | 261 | 210  | 162    |

Таблица 18.9. Сечение резонансной перезарядки отрицательного иона на собственном атоме,  $10^{-16}$  см<sup>2</sup> [20]

| Атом | Энергия столкновения, эВ |     |     |     |      |        |
|------|--------------------------|-----|-----|-----|------|--------|
|      | 0,1                      | 1,0 | 10  | 100 | 1000 | 10 000 |
| H    | 415                      | 266 | 172 | 104 | 23   | —      |
| Li   | 640                      | 480 | 375 | 233 | 145  | 79     |
| B    | 323                      | 239 | 140 | 72  | 30   | 9,2    |
| C    | 166                      | 118 | 80  | 50  | 29   | 14,1   |
| O    | 123                      | 85  | 55  | 33  | 17,6 | 8,1    |
| F    | 85                       | 59  | 41  | 27  | 16,6 | 9,2    |
| Na   | 822                      | 628 | 461 | 322 | 209  | 123    |
| Al   | 380                      | 292 | 202 | 126 | 62   | 36     |
| Si   | 222                      | 166 | 120 | 82  | 53   | 31     |
| P    | 293                      | 212 | 145 | 93  | 54   | 28     |
| S    | 148                      | 110 | 78  | 53  | 34   | 19,4   |
| Cl   | 122                      | 84  | 61  | 43  | 29   | 18,5   |
| K    | 939                      | 723 | 537 | 380 | 252  | 152    |
| Fe   | —                        | 807 | 588 | 406 | 261  | 150    |
| Co   | 605                      | 475 | 361 | 263 | 182  | 117    |
| Ni   | 463                      | 368 | 284 | 211 | 150  | 100    |
| Cu   | 472                      | 373 | 286 | 212 | 149  | 98     |
| Se   | 181                      | 138 | 101 | 71  | 47   | 29     |
| Br   | 153                      | 104 | 77  | 56  | 39   | 26     |
| Rb   | —                        | 906 | 691 | 507 | 253  | 229    |
| Ag   | 487                      | 388 | 302 | 227 | 163  | 110    |
| Sn   | 313                      | 242 | 181 | 130 | 89   | 57     |
| Sb   | 326                      | 254 | 187 | 132 | 88   | 54     |
| Te   | 220                      | 170 | 127 | 91  | 62   | 40     |
| I    | 162                      | 129 | 99  | 74  | 53   | 36     |
| Cs   | —                        | —   | —   | —   | 773  | 505    |
| Au   | 320                      | 265 | 216 | 171 | 132  | 99     |

## 18.5. ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫЕ РЕАКЦИИ

Таблица 18.10. Константа скорости процессов, происходящих при участии молекулярных ионов,  $k$ ,  $10^{-30}$  см<sup>6</sup>/с ( $T \approx 300$  K) [21]

| Процесс                                                          | $k$  | Процесс                                                                       | $k$        |
|------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| $\text{He}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{He}$ | 1,0  | $\text{Hg}^+ + 2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^+ + \text{Hg}$              | 1 (700 K)  |
| $\text{Ne}^+ + 2\text{Ne} \rightarrow \text{Ne}_2^+ + \text{Ne}$ | 0,60 | $\text{He}_2^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_3^+ + \text{He}$            | 1,7 (77 K) |
| $\text{Ar}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar}$ | 2,2  | $\text{Ar}_2^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_3^+ + \text{Ar}$            | 32 (77 K)  |
| $\text{Kr}^+ + 2\text{Kr} \rightarrow \text{Kr}_2^+ + \text{Kr}$ | 2,3  | $\text{Ar}_2^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_3^+ + \text{He}$ | 5,5 (80 K) |
| $\text{Xe}^+ + 2\text{Xe} \rightarrow \text{Xe}_2^+ + \text{Xe}$ | 2,8  | $\text{Cs}_2^+ + 2\text{Cs} \rightarrow \text{Cs}_3^+ + \text{Cs}$            | 300        |
| $\text{Cs}^+ + 2\text{Cs} \rightarrow \text{Cs}_2^+ + \text{Cs}$ | 150  | $\text{Ne}^+ + \text{Ne} + \text{He} \rightarrow \text{Ne}_2^+ + \text{He}$   | 3,0        |

| Процесс                                                                                                    | $k$         | Процесс                                                                                          | $k$         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| $\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{He}$                                | 1,0 (82 K)  | $\text{Ca}^+ + \text{O}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{CaO}_2^+ + \text{Ar}$                    | 6,6         |
| $\text{Kr}^+ + \text{Kr} + \text{He} \rightarrow \text{Kr}_2^+ + \text{He}$                                | 0,6         | $\text{Fe}^+ + \text{O}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{FeO}_2^+ + \text{Ar}$                    | 1,0         |
| $\text{Xe}^+ + \text{Xe} + \text{He} \rightarrow \text{Xe}_2^+ + \text{He}$                                | 1,3         | $\text{Na}^+ + \text{O}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{NaO}_2^+ + \text{Ar}$                    | 0,2         |
| $\text{Hg}^+ + \text{Hg} + \text{He} \rightarrow \text{Hg}_2^+ + \text{He}$                                | 1,7 (700 K) | $\text{K}^+ + \text{O}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{KO}_2^+ + \text{Ar}$                      | <0,2        |
| $\text{Ne}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{NeHe}^+ + \text{He}$                                           | 0,21        | $\text{Li}^+ + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{LiN}_2^+ + \text{N}_2$                              | 2,0         |
| $\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ne} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ne}$                                | 3           | $\text{Li}^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{LiO}_2^+ \rightarrow \text{O}_2$                    | 1,1         |
| $\text{HeH}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2\text{H}^+ + \text{He}$                                  | 0,4 (200 K) | $\text{Na}^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NaO}_2^+ + \text{O}_2$                              | 0,1 (193 K) |
| $\text{H}_3^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{H}_3^+ \text{Ar} + \text{Ar}$                                 | 1           | $\text{LiN}_2^+ + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{Li} (\text{N}_2)_2^+ + \text{N}_2$               | 2,2         |
| $\text{Li}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Li}^+ \text{Ar} + \text{Ar}$                                   | 1,8         | $\text{O}_2\text{N}_2^+ + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{N}_4\text{O}_2^+ + \text{He}$ | 10 (80 K)   |
| $\text{H}^+ + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}_2$                                           | 30          | $\text{O}_4^+ + \text{O}_2 + \text{He} \rightarrow \text{O}_6^+ + \text{He}$                     | 5 (80 K)    |
| $\text{D}^+ + 2\text{D}_2 \rightarrow \text{D}_3^+ + \text{D}_2$                                           | 30          | $\text{O}_4^+ + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{O}_4\text{N}_2^+ + \text{He}$           | 10 (80 K)   |
| $\text{H}_3^+ + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_5^+ + \text{H}_2$                                         | 0,65        | $\text{O}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_6^+ + \text{O}_2$                               | 0,07        |
| $\text{D}_3^+ + 2\text{D}_2 \rightarrow \text{D}_5^+ + \text{D}_2$                                         | 0,45        | $\text{O}_6^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_8^+ + \text{O}_2$                               | 25 (90 K)   |
| $\text{N}^+ + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{N}_3^+ + \text{N}_2$                                           | 30          | $\text{NO}^+ + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ \text{N}_2 + \text{N}_2$                      | 0,2         |
| $\text{N}^+ + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{N}_3^+ + \text{He}$                                 | 30 (80 K)   | $\text{NO}^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^+ + \text{O}_2$                               | 0,09        |
| $\text{N}_2^+ + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{N}_4^+ + \text{N}_2$                                         | 85          | $\text{NO}^+ + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{NOCO}_2^+ + \text{CO}_2$                           | 24          |
| $\text{O}_2^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_4^+ + \text{O}_2$                                         | 2,5         | $\text{NO}^+ + \text{CO}_2 + \text{He} \rightarrow \text{NOCO}_2^+ + \text{He}$                  | 4           |
| $\text{O}_2^+ + \text{O}_2 + \text{He} \rightarrow \text{O}_4^+ + \text{He}$                               | 1,5         | $\text{NO}^+ + \text{CO}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{NOCO}_2^+ + \text{Ar}$                  | 25 (200 K)  |
| $\text{O}_2^+ + \text{O}_2 + \text{Kr} \rightarrow \text{O}_4^+ + \text{Kr}$                               | 8 (180 K)   | $\text{NO}^+ + \text{CO}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NOCO}_2^+ + \text{N}_2$                | 30 (200 K)  |
| $\text{O}_2^+ + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_4^+ + \text{H}_2\text{O}$             | 1,5         | $\text{NO}^+ + 2\text{NH}_3 \rightarrow \text{NONH}_3^+ + \text{NH}_3$                           | 54          |
| $\text{O}_2^+ + 2\text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ \text{N}_2 + \text{N}_2$                              | 0,8         | $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{H}_7^+ + \text{O}_2$       | 1800        |
| $\text{O}_2^+ + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{O}_2^+ \text{N}_2 + \text{He}$                    | 19 (80 K)   | $\text{Na}^+ + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{NaCO}_2^+ + \text{CO}_2$                           | 50          |
| $\text{O}_2^+ + \text{H}_2 + \text{He} \rightarrow \text{O}_2^+ \text{H}_2 + \text{He}$                    | 0,74 (80 K) | $\text{Na}^+ \text{CO}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}^+ (\text{CO}_2)_2 + \text{CO}_2$   | 0,05        |
| $\text{O}_2^+ + \text{O}_3 + \text{He} \rightarrow \text{O}_5^+ + \text{He}$                               | 100 (200 K) | $\text{Cs}^+ + \text{SO}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{CsSO}_2^+ + \text{N}_2$                | 30          |
| $\text{O}^+ + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{N}_2\text{O}^+ + \text{He}$                         | 54 (80 K)   | $\text{Na}^+ + \text{He} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaH}_2\text{O}^+ + \text{He}$    | 4,7         |
| $\text{NO}^+ + 2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_2^+ + \text{NO}$                                  | 5           | $\text{Na}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O}$      | 100         |
| $\text{CO}^+ + 2\text{CO} \rightarrow \text{C}_2\text{O}_2^+ + \text{CO}$                                  | 140         | $\text{K}^+ + \text{He} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KH}_2\text{O}^+ + \text{He}$      | 2,6         |
| $\text{CO}_2^+ + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{O}_4^+ + \text{CO}_2$                            | 320         | $\text{K}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{KH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O}$        | 45          |
| $\text{C}_2\text{H}_2^+ + 2\text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_4\text{H}_8^+ + \text{C}_2\text{H}_4$ | 2000        | $\text{Cs}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{CsH}_2\text{O}^+ + \text{N}_2$  | 9           |
| $\text{O}_2^+ + \text{CO}_2 + \text{He} \rightarrow \text{CO}_4^+ + \text{He}$                             | 23 (200 K)  | $\text{Xe}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{XeH}_2\text{O}^+ + \text{He}$    | 15          |
| $\text{O}_2^+ + \text{N}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_3^+ + \text{He}$             | 52 (200 K)  | $\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{He}$    | 34          |
| $\text{O}_2^+ + \text{SO}_2 + \text{He} \rightarrow \text{SO}_4^+ + \text{He}$                             | 600 (200 K) | $\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{N}_2$  | 150         |
| $\text{Mg}^+ + \text{O}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{MgO}_2^+ + \text{Ar}$                              | 2,5         | $\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{O}_2$  | 86          |

| Процесс                                                                                                               | $k$  | Процесс                                                                                                    | $k$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| $\text{NO}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{NO}$                         | 150  | $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{Ar} \rightarrow \text{H}_5\text{O}_2^+ + \text{Ar}$     | 40  |
| $\text{NO}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O}$                           | 150  | $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H}_5\text{O}_2^+ + \text{N}_2$   | 340 |
| $\text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{NO}(\text{H}_2\text{O})_2^+ + \text{He}$   | 300  | $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_5\text{O}_2^+ + \text{O}_2$   | 270 |
| $\text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{Ar} \rightarrow \text{NO}(\text{H}_2\text{O})_2^+ + \text{Ar}$   | 900  | $\text{NO}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}_2\text{H}_2\text{O}^+ + \text{N}_2$ | 500 |
| $\text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}(\text{H}_2\text{O})_2^+ + \text{N}_2$ | 1100 | $\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_3^+ + \text{He}$             | 87  |
| $\text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}(\text{H}_2\text{O})_2^+ + \text{O}_2$ | 800  | $\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_3^+ + \text{N}_2$           | 270 |
| $\text{NOH}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{NO}(\text{H}_2\text{O})_2^+ + \text{NO}$   | 1100 | $\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_3^+ + \text{O}_2$           | 200 |
| $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{H}_5\text{O}_2^+ + \text{He}$                | 120  | $\text{O}_2^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{Ar} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_3^+ + \text{Ar}$             | 170 |

Таблица 18.11. Константы скорости процессов, происходящих при участии молекулярных отрицательных ионов,  $k$ ,  $10^{-30}$  см<sup>6</sup> ( $T = 300$  К) [21]

| Процесс                                                                                | $k$          |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| $\text{O}^- + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3^- + \text{O}_2$                       | 0,9          |
| $\text{O}_2^- + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{O}_4^- + \text{O}_2$                     | 0,4          |
| $\text{O}_2^- + \text{O}_2 + \text{He} \rightarrow \text{O}_4^- + \text{He}$           | 0,34 (200 К) |
| $\text{O}^- + \text{CO}_2 + \text{He} \rightarrow \text{CO}_3^- + \text{He}$           | 150          |
| $\text{O}^- + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_3^- + \text{CO}_2$                    | 90           |
| $\text{O}_2^- + \text{CO}_2 + \text{He} \rightarrow \text{CO}_4^- + \text{He}$         | 47 (200 К)   |
| $\text{O}_2^- + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_4^- + \text{CO}_2$                  | 9            |
| $\text{O}_2^- + \text{CO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_4^- + \text{O}_2$       | 20           |
| $\text{O}^- + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{N}_2\text{O}^- + \text{He}$     | 0,04 (200 К) |
| $\text{O}_2^- + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{N}_2\text{O}_2^- + \text{He}$ | 0,04 (200 К) |

Продолжение табл. 18.11

| Процесс                                                                                                    | $k$    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| $\text{O}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2^- + \text{O}_2$             | 100    |
| $\text{O}_2^- + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_3^- + \text{O}_2$           | 160    |
| $\text{O}_3^- + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_4^- + \text{O}_2$           | 210    |
| $\text{H}_2\text{O}_3^- + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_4\text{O}_4^- + \text{O}_2$ | 540    |
| $\text{NO}^- + \text{CO}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{NO}^-\text{CO}_2 + \text{Ar}$                     | 56     |
| $\text{NO}^- + \text{N}_2\text{O} + \text{Ar} \rightarrow \text{N}_3\text{O}_2^- + \text{Ar}$              | 7,8    |
| $\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2\text{H}_2\text{O}^- + \text{NO}$   | 150    |
| $\text{Br}^- + 2\text{Br}_2 \rightarrow \text{Br}_3^- + \text{Br}_2$                                       | 29     |
| $\text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{ClH}_2\text{O}^- + \text{NO}$              | 120    |
| $\text{WO}_3^- + \text{O}_2 + \text{Ar} \rightarrow \text{WO}_5^- + \text{Ar}$                             | $10^3$ |

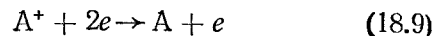
## 18.6. ПРОЦЕССЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ

Нейтрализация заряженных частиц в объеме плазмы происходит в результате различных рекомбинационных процессов. Эти процессы характеризуются коэффициентом рекомбинации, который определяется соотношением

$$dN_-/dt = -\alpha_{\text{рек}} N_- N_+, \quad (18.8)$$

где  $N_-$ ,  $N_+$  — концентрации отрицательно и положительно заряженных частиц;  $\alpha_{\text{рек}}$  — коэффициент рекомбинации, который зависит от сорта рекомбинирующих частиц, состояния плазмы и конкретного механизма рекомбинации.

**Тройная рекомбинация.** Процесс, ответственный за нейтрализацию плазмы с достаточно высокой плотностью заряженных частиц, описывается формулой



(А — атомарный или молекулярный ион). Выражение для коэффициента тройной рекомбинации, см<sup>3</sup>/с, имеет вид [12]

$$\alpha_{тр} \approx \frac{4e^{10}}{m^{1/2} T_e^{9/2}}; \quad N_e \approx \frac{0,6 \cdot 10^{-27} N_e}{T_e^{9/2}}, \quad (18.10)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $N_e$  — плотность электронов, см<sup>-3</sup>;  $T_e$  — температура электронов, эВ. Выражение (18.10) справедливо в пределе больших плотностей электронов, когда переходы между высоковозбужденными состояниями атомов (молекул) обусловлены неупругими соударениями с электронами, а излучательные процессы несущественны. Кроме того, предполагается, что температура электронов  $T_e$  много меньше потенциала ионизации атомной частицы, так что при столкновениях наиболее вероятны переходы между близко расположенными энергетическими состояниями. При нарушении указанных условий коэффициент тройной рекомбинации будет зависеть от сорта рекомбинирующей частицы. На рис. 18.3 представлены зависимости отношения  $\alpha_{тр}/N_e$  от температуры плазмы для атомов K, Cs, N, Ag, He, H [12]

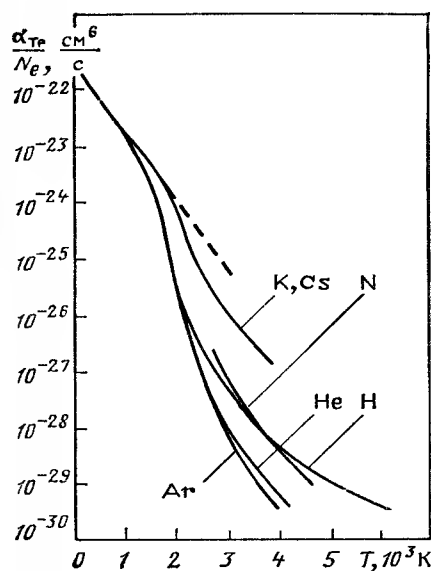
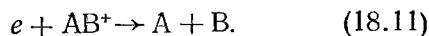


Рис. 18.3. Коэффициент радиационно-столкновительной рекомбинации при различной температуре для различных газов [12]

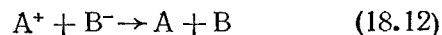
**Диссоциативная рекомбинация.** Этот процесс является основным каналом нейтрализации заряженных частиц в низкотемпературной плазме, где основным сортом положительных ионов являются молекулярные ионы [15]:



Обычно один из продуктов диссоциативной рекомбинации оказывается в электронно-возбужденном состоянии. Значения константы скорости диссоциативной рекомбинации, полученные в результате усреднения многочисленных экспериментальных данных, представлены в табл. 18.12, погрешность составляет 10—20%. Данные об энергетической зависимости сечений и температурной зависимости коэффициентов диссоциативной рекомбинации приведены

в табл. 18.13, где указаны также диапазоны температуры и энергий, в которых погрешность приводимых аппроксимаций не превышает 30%.

**Ион-ионная рекомбинация.** В плазме электроотрицательных газов важный механизм нейтрализации заряженных частиц связан с ион-ионной рекомбинацией:



или



Значения константы скорости парной ион-ионной рекомбинации (18.12) при комнатной температуре приведены в табл. 18.14. Эти данные получены путем усреднения по результатам многочисленных экспериментов [17]. Погрешность указанных данных достигает 50%. Коэффициент парной ион-ионной рекомбинации характеризуется следующей зависимостью от температуры газа:

$$\alpha = \alpha_0 (T_0/T)^{1/2}, \quad (18.14)$$

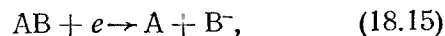
где  $\alpha_0$  — значения коэффициента при  $T = T_0$ .

При давлении, превышающем несколько сотен паскалей, основным механизмом ион-ионной рекомбинации становится не парная (18.12), а тройная (18.13) рекомбинация. Константа скорости этого процесса характеризуется монотонной зависимостью от давления с максимумом при  $p \approx 10^5$  Па [17].

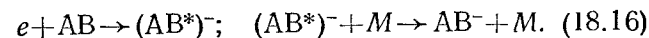
В табл. 18.15 представлены зависимости констант скорости тройной ион-ионной рекомбинации отрицательного иона галогена и положительного иона инертного газа от плотности инертного газа, атомы которого играют роль третьей частицы [19].

## 18.7. ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

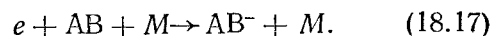
Отрицательные ионы могут образовываться в результате парных процессов диссоциативного прилипания электронов [17]:



в результате захвата электрона в автоионизационное состояние отрицательного иона и последующего тушения этого состояния при столкновении с третьей частицей:



и в результате прилипания электрона к молекуле при тройном столкновении:



Константа скорости диссоциативного прилипания (18.15) является функцией средней энергии электронов в газе. Константа скорости процесса (18.16) измеряется в см<sup>3</sup>/с, однако зависит от давления и состава газовой смеси. Константа скорости тройного прилипания, см<sup>6</sup>/с, зависит от температуры и состава газа. В табл. 18.6—18.20 и на рис. 18.4 приведены сечения и константы скорости процессов (18.15)—(18.17).

Таблица 18.12. Коэффициент диссоциативной рекомбинации при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [15]

| Ион      | $\text{H}_2^+$    | $\text{Ne}_2^+$             | $\text{Ar}_2^+$             | $\text{Kr}_2^+$                   | $\text{Xe}_2^+$                 | $\text{HeNe}^+$                 | $\text{C}_2^+$           | $\text{O}_2^+$                | $\text{N}_2^+$   | $\text{NO}^+$               |
|----------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|
| $\alpha$ | 0,3               | 1,8                         | 6,9                         | 10,3                              | 20                              | 0,2                             | 10 (100K)                | 2,0                           | 3,3              | 3,7                         |
| Ион      | $\text{CH}^+$     | $\text{CO}^+$               | $\text{CO}_2^+$             | $\text{CH}_2^+$                   |                                 | $\text{He}_3^+$                 | $\text{Cs}_2^+$          | $\text{Cs}_3^+$               |                  |                             |
| $\alpha$ | 5 (100 K)         | 6,8                         | 3,6                         | 8,7 (100 K)                       |                                 | 34 (80 K)                       | 1,7 (600 K)              | 0,2 (600 K)                   |                  |                             |
| Ион      | $\text{O}_4^+$    | $\text{N}_4^+$              | $\text{N}_2\text{O}_2^+$    | $\text{H}_3\text{O}^+$            | $\text{H}_5\text{O}_2^+$        | $\text{H}_7\text{O}_3^+$        | $\text{H}_9\text{O}_4^+$ | $\text{NH}_4^+$               | $\text{NaO}_2^+$ |                             |
| $\alpha$ | 23 (200 K)        | 15                          | 17                          | 10 (540 K)                        | 20 (540 K)                      | 34                              | 36                       | 18                            | 50               |                             |
| Ион      | $\text{NaCO}_2^+$ | $\text{H}_{11}\text{O}_5^+$ | $\text{H}_{13}\text{O}_6^+$ | $\text{NH}_4 \cdot \text{NH}_3^+$ | $\text{NH}_4 (\text{NH}_3)_2^+$ | $\text{NH}_4 (\text{NH}_3)_3^+$ | $\text{H}_3^+$           | $\text{CO} \cdot \text{CO}^+$ | $\text{H}_5^+$   | $\text{CO}^+ (\text{CO})_2$ |
| $\alpha$ | 50                | 80                          | 28                          | 27                                | 25                              | 25                              | 2,3                      | 13                            | 30               | 19                          |

Таблица 18.13. Энергетическая зависимость сечения и температурная зависимость константы скорости диссоциативной рекомбинации электронов и молекулярных ионов [16]

| Ион            | $\sigma, 10^{-15} \text{ см}^2$                   | $\tau, 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$       | Примечание |
|----------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------|
| $\text{H}_2^+$ | $8 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{0,92}$  | $2,3 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,4}$  | —          |
| $\text{HD}^+$  | $8 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{0,92}$  | $2,3 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,4}$  | —          |
| $\text{D}_2^+$ | $5,5 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{0,8}$ | $1,6 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,3}$  | —          |
| $\text{CH}^+$  | $8 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{0,92}$  | $3 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,4}$    | —          |
| $\text{NH}^+$  | $2,5 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{1,0}$ | $0,86 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$ | —          |
| $\text{OH}^+$  | $2 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{1,0}$   | $0,75 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$ | —          |
| $\text{C}_2^+$ | $14 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{1,0}$  | $6 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$    | —          |
| $\text{N}_2^+$ | $10 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{1,0}$  | $3,5 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$  | —          |
| $\text{NO}^+$  | $5 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{1,0}$   | $2,3 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$  | —          |
| $\text{O}_2^+$ | $4,5 \left( \frac{0,1}{\epsilon_e} \right)^{1,0}$ | $1,9 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$  | —          |

| Ион                          | $\sigma$ , $10^{-15}$ см <sup>2</sup>                | $\alpha$ , $10^{-7}$ см <sup>3</sup> /с                                        | Примечание                                |
|------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Ne <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —                                                    | $1,8 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,43} \left( \frac{300}{T} \right)^{1,1}$ | —                                         |
| Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —                                                    | $9,1 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,61} \left( \frac{300}{T} \right)^{0,7}$ | —                                         |
| Kr <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —                                                    | $16 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,55}$                                     | —                                         |
| Xe <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —                                                    | $27 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,6}$                                      | —                                         |
| H <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | $10 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$  | $2,3 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$                                     | —                                         |
| HD <sub>2</sub> <sup>+</sup> | $8 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$   | —                                                                              | —                                         |
| D <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | $6 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{0,84}$  | —                                                                              | —                                         |
| CH <sub>2</sub> <sup>+</sup> | $13 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$  | $5,0 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$                                     | —                                         |
| CH <sub>3</sub> <sup>+</sup> | $16 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$  | $7,0 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$                                     | $T_e < 2000$ К, $\varepsilon_e < 0,15$ эВ |
|                              | $6 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,6}$   | —                                                                              | $\varepsilon_e > 0,15$ эВ                 |
| CH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | $14 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$  | $7,0 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$                                     | $\varepsilon_e < 0,07$ эВ, $T_e < 1000$ К |
|                              | $5,6 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^{1,5}$ | —                                                                              | $\varepsilon_e > 0,07$ эВ                 |
| CH <sub>5</sub> <sup>+</sup> | $14 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$  | $7,0 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$                                     | $\varepsilon_e < 0,08$ эВ, $T_e < 1000$ К |
|                              | $5,6 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^{1,5}$ | —                                                                              | $\varepsilon_e > 0,08$ эВ                 |
| NH <sub>2</sub> <sup>+</sup> | $30 \left( \frac{0,04}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$ | —                                                                              | $\varepsilon_e < 0,05$ эВ                 |
|                              | $9 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,35}$  | —                                                                              | $\varepsilon_e > 0,05$ эВ                 |
| NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> | $31 \left( \frac{0,07}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$ | —                                                                              | $\varepsilon_e < 0,09$ эВ                 |
|                              | $6,5 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^{1,8}$ | —                                                                              | $\varepsilon_e > 0,09$ эВ                 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | $11 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,4}$  | $13 \left( \frac{410}{T_e} \right)^{0,5}$                                      | $\varepsilon_e < 0,5$ эВ                  |



| Ион                                                              | $\sigma$ , $10^{-18}$ см <sup>2</sup>                 | $\alpha$ , $10^{-7}$ см <sup>3</sup> /с     | Примечание                               |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>                                    | $0,5 \left( \frac{0,5}{\varepsilon_e} \right)^{3,43}$ | —                                           | $\varepsilon_e > 0,5$ эВ                 |
|                                                                  | $18 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$   | —                                           | $\varepsilon_e < 0,15$ эВ                |
|                                                                  | $6 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^{2,0}$    | —                                           | $\varepsilon_e > 0,15$ эВ                |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> (D <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )   | $18 \left( \frac{0,08}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$  | $6,3 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$  | $\varepsilon_e < 0,1$ эВ, $T_e < 1000$ К |
|                                                                  | $5 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^2$        | —                                           | $\varepsilon_e > 0,1$ эВ                 |
| C <sub>2</sub> H <sup>+</sup>                                    | $14 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$   | $5,4 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$  | —                                        |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup>                       | $14 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$   | $5,4 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$  | $\varepsilon_e < 0,1$ эВ                 |
|                                                                  | $60 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^{1,2}$   | —                                           | $\varepsilon_e > 0,1$ эВ                 |
| C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>+</sup>                       | $20 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$   | $9 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,5}$    | $\varepsilon_e < 0,1$ эВ                 |
|                                                                  | $8,4 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^{1,3}$  | —                                           | $\varepsilon_e > 0,1$ эВ                 |
| HCO <sup>+</sup>                                                 | —                                                     | 2,0                                         | $T_e = 300$ К                            |
| N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> · (N <sub>2</sub> O <sup>+</sup> ) | $12 \left( \frac{0,1}{\varepsilon_e} \right)^{1,0}$   | $7,5 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{2,5}$  | $\varepsilon_e < 0,1$ эВ                 |
|                                                                  | $4,4 \left( \frac{0,2}{\varepsilon_e} \right)^{1,3}$  | —                                           | $\varepsilon_e > 0,1$ эВ                 |
| CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>                                     | —                                                     | 3,8                                         | $T_e = 300$ К                            |
| H <sub>5</sub> <sup>+</sup>                                      | —                                                     | 36                                          | $T_e = 205$ К                            |
|                                                                  | —                                                     | 25                                          | $T_e = 300$ К                            |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ·(H <sub>2</sub> O)                | —                                                     | 22                                          | $T_e = 415$ К                            |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ·(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>   | —                                                     | 38                                          | $T_e = 300$ К                            |
|                                                                  | —                                                     | —                                           | $T_e = 300$ К                            |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ·(H <sub>2</sub> O) <sub>3</sub>   | —                                                     | 49                                          | $T_e = 205$ К                            |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ·(H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub>   | —                                                     | 60                                          |                                          |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ·(H <sub>2</sub> O) <sub>5</sub>   | —                                                     | 75                                          |                                          |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ·(NH <sub>3</sub> )                 | —                                                     | $28 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,147}$ | —                                        |
|                                                                  |                                                       | —                                           |                                          |

| Ион                                   | $\sigma$ , $10^{-15}$ см <sup>2</sup> | $\alpha$ , $10^{-7}$ см <sup>3</sup> /с    | Примечание    |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| $\text{NH}_4^+ \cdot (\text{NH}_3)_2$ | —                                     | $27 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,05}$ | —             |
| $\text{NH}_4^+ \cdot (\text{NH}_3)_3$ | —                                     | 30                                         | $T_e = 200$ К |
| $\text{N}_4^+$                        | —                                     | $14 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,41}$ | —             |
| $\text{CO}^+ \cdot (\text{CO})$       | —                                     | $13 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,34}$ | —             |
| $\text{CO}^+ \cdot (\text{CO})_2$     | —                                     | $19 \left( \frac{300}{T_e} \right)^{0,33}$ | —             |
| $\text{O}_2^+ \cdot (\text{O}_2)$     | —                                     | 23                                         | $T_e = 205$ К |

Таблица 18.14. Константа скорости парной ион-ионной рекомбинации при  $T = 300$  К.  $10^{-7}$  см<sup>3</sup>/с [17, 18]

| Пара                            | $k$ [17] | Пара                                                                       | $k$ [18] |
|---------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------|----------|
| $\text{H}^+ + \text{H}^-$       | 8,6      | $\text{CCl}_3^+ + \text{Cl}^-$                                             | 0,45     |
| $\text{O}^+ + \text{O}^-$       | 1,4      | $\text{CCl}_2\text{F}^+ + \text{Cl}^-$                                     | 0,41     |
| $\text{N}^+ + \text{O}^-$       | 1,4      | $\text{CCl}_2\text{F}_2^+ + \text{Cl}^-$                                   | 0,41     |
| $\text{O}_2^+ + \text{O}_2^-$   | 4,2      | $\text{NH}_4^+ + \text{Cl}^-$                                              | 0,67     |
| $\text{N}_2^+ + \text{O}_2^-$   | 1,6      | $\text{Cl}_2^+ + \text{Cl}^-$                                              | 0,5      |
| $\text{NO}^+ + \text{NO}_2^-$   | 3,4      | $\text{O}_2^+ + \text{CO}_3^-$                                             | 0,95     |
| $\text{O}_2^+ + \text{NO}_2^-$  | 4,1      | $\text{CF}_3^+ + \text{F}^-$                                               | 0,58     |
| $\text{NO}^+ + \text{NO}_3^-$   | 0,45     | $\text{NF}_2^+ + \text{F}^-$                                               | 0,75     |
| $\text{O}^+ + \text{O}_2^-$     | 2        | $\text{N}_2\text{F}^+ + \text{F}^-$                                        | 0,85     |
| $\text{Na}^+ + \text{O}^-$      | 1,3      | $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{H}_2\text{O})_3 + \text{NO}_3^-$              | 0,55     |
| $\text{O}_2^+ + \text{O}^-$     | 1,2      | $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{H}_2\text{O})_3 + \text{NO}_3^- \text{HNO}_3$ | 0,57     |
| $\text{NO}^+ + \text{O}^-$      | 1,2      | $\text{NO}^+ (\text{NO}_2)_2 + \text{NO}_3^- (\text{HNO}_3)_3$             | 0,35     |
| $\text{SF}_3^+ + \text{SF}_5^-$ | 0,4      | $\text{NH}_4^+ (\text{NH}_3)_2 + \text{Cl}^-$                              | 0,79     |
| $\text{SF}_5^+ + \text{SF}_6^-$ | 0,4      | $\text{NH}_4^+ (\text{NH}_3)_2 + \text{NO}_2^-$                            | 0,49     |
| $\text{CCl}_2^+ + \text{Cl}^-$  | 0,45     | $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{H}_2\text{O})_3 + \text{Cl}^-$                | 0,68     |

Таблица 18.15. Коэффициент тройной ион-ионной рекомбинации при различных значениях концентрации атомов инертного газа при  $T = 300$  К,  $10^{-6}$  см<sup>3</sup>/с [19]

| Пара                          | Инертный газ | Концентрация атомов инертного газа, $10^{19}$ см <sup>-3</sup> |      |      |     |      |      |      |      |
|-------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|
|                               |              | 0,27                                                           | 0,81 | 2,7  | 5,4 | 10,8 | 27   | 54   | 135  |
| $\text{Kr}^+ + \text{F}^-$    | Ne           | 0,19                                                           | 0,52 | 1,5  | 2,4 | 3,0  | 2,1  | 1,2  | 0,45 |
|                               | Ar           | 0,33                                                           | 0,84 | 2,2  | 2,7 | 2,2  | 1,0  | 0,49 | 0,20 |
|                               | Kr           | 0,36                                                           | 0,93 | 2,2  | 2,1 | 0,91 | 0,56 | 0,2  | 0,13 |
|                               | Xe           | 0,47                                                           | 1,2  | 2,4  | 2,0 | 0,8  | 0,47 | 0,26 | 0,09 |
| $\text{Kr}_2^+ + \text{F}^-$  | Ne           | 0,18                                                           | 0,48 | 1,4  | 2,1 | 2,6  | 2,0  | 1,2  | 0,45 |
|                               | Ar           | 0,29                                                           | 0,73 | 1,8  | 2,5 | 2,0  | 0,95 | 0,48 | 0,19 |
|                               | Kr           | 0,33                                                           | 0,85 | 2,0  | 2,2 | 1,5  | 0,60 | 0,3  | 0,13 |
|                               | Xe           | 0,37                                                           | 0,96 | 2,0  | 1,8 | 1,1  | 0,44 | 0,23 | 0,09 |
| $\text{Xe}^+ + \text{Cl}^-$   | Ne           | 0,12                                                           | 0,3  | 0,86 | 1,6 | 2,3  | 2,1  | 1,3  | 0,50 |
|                               | Ar           | 0,26                                                           | 0,68 | 1,7  | 2,2 | 1,8  | 0,8  | 0,41 | 0,17 |
|                               | Kr           | 0,31                                                           | 0,80 | 1,8  | 1,9 | 1,3  | 0,54 | 0,27 | 0,12 |
|                               | Xe           | 0,36                                                           | 0,88 | 1,7  | 1,4 | 0,8  | 0,34 | 0,17 | —    |
| $\text{Xe}_2^+ + \text{Cl}^-$ | Ne           | 0,11                                                           | 0,30 | 0,80 | 1,4 | 2,0  | 20   | 1,2  | 0,48 |
|                               | Ar           | 0,23                                                           | 0,60 | 1,5  | 1,9 | 1,8  | 0,81 | 0,42 | 0,17 |
|                               | Kr           | 0,27                                                           | 0,70 | 1,6  | 1,8 | 1,3  | 0,52 | 0,27 | 0,11 |
|                               | Xe           | 0,30                                                           | 0,80 | 1,6  | 1,5 | 0,9  | 0,40 | 0,19 | —    |

Таблица 18.16. Сечение диссоциативного прилипания электрона к молекуле  $\text{SO}_2$ , отвечающее образованию отрицательных ионов различного сорта,  $10^{-18} \text{ см}^2$  [23]

| Энергия электро-<br>на, эВ | Сорт отрицательного иона |                |                 |
|----------------------------|--------------------------|----------------|-----------------|
|                            | O <sup>-</sup>           | S <sup>-</sup> | SO <sup>-</sup> |
| 2,5                        | 0,01                     | 0,0            | 0,0             |
| 3,0                        | 0,10                     | 0,013          | 0,02            |
| 3,1                        | 0,16                     | 0,019          | 0,0             |
| 3,2                        | 0,22                     | 0,034          | 0,03            |
| 3,3                        | 0,36                     | 0,056          | 0,03            |
| 3,4                        | 0,58                     | 0,079          | 0,16            |
| 3,5                        | 0,89                     | 0,122          | 0,16            |
| 3,6                        | 1,34                     | 0,167          | 0,36            |
| 3,7                        | 2,20                     | 0,225          | 0,54            |
| 3,8                        | 3,16                     | 0,276          | 0,84            |
| 3,9                        | 4,38                     | 0,298          | 1,41            |
| 4,0                        | 5,58                     | 0,313          | 2,05            |
| 4,1                        | 6,92                     | 0,310          | 3,27            |
| 4,2                        | 7,52                     | 0,295          | 4,58            |
| 4,3                        | 8,08                     | 0,271          | 6,94            |
| 4,4                        | 8,02                     | 0,246          | 8,51            |
| 4,5                        | 7,22                     | 0,231          | 10,10           |
| 4,6                        | 6,48                     | 0,191          | 10,80           |
| 4,7                        | 5,48                     | 0,162          | 10,98           |
| 4,8                        | 4,69                     | 0,164          | 10,53           |
| 4,9                        | 3,79                     | 0,131          | 9,07            |
| 5,0                        | 2,14                     | 0,114          | 7,76            |
| 5,1                        | 2,56                     | 0,091          | 5,86            |
| 5,2                        | 1,90                     | 0,065          | 4,84            |
| 5,4                        | 1,12                     | 0,044          | 2,80            |
| 5,6                        | 0,69                     | 0,028          | 1,21            |
| 5,8                        | 0,45                     | 0,013          | 0,62            |
| 6,0                        | 0,43                     | 0,015          | 0,39            |
| 6,2                        | 0,81                     | 0,008          | 0,33            |

Продолжение табл. 18.16

| Энергия электро-<br>на, эВ | Сорт отрицательного иона |                |                 |
|----------------------------|--------------------------|----------------|-----------------|
|                            | O <sup>-</sup>           | S <sup>-</sup> | SO <sup>-</sup> |
| 6,3                        | 0,86                     | 0,018          | 0,46            |
| 6,4                        | 1,17                     | 0,017          | 0,40            |
| 6,5                        | 1,32                     | 0,020          | 0,58            |
| 6,6                        | 1,59                     | 0,022          | 0,44            |
| 6,7                        | 1,80                     | 0,019          | 0,52            |
| 6,8                        | 2,10                     | 0,017          | 0,58            |
| 6,9                        | 2,33                     | 0,025          | 0,41            |
| 7,0                        | 2,56                     | 0,027          | 0,42            |
| 7,1                        | 2,68                     | 0,026          | 0,40            |
| 7,2                        | 2,41                     | 0,030          | 0,42            |
| 7,3                        | 2,47                     | 0,031          | 0,51            |
| 7,4                        | 2,41                     | 0,031          | 0,44            |
| 7,5                        | 2,14                     | 0,036          | 0,51            |
| 7,6                        | 1,89                     | 0,030          | 0,43            |
| 7,7                        | 1,56                     | 0,029          | 0,33            |
| 7,8                        | 1,33                     | 0,027          | 0,28            |
| 7,9                        | 1,06                     | 0,016          | 0,21            |
| 8,0                        | 0,93                     | 0,015          | 0,21            |
| 8,1                        | 0,76                     | 0,015          | 0,13            |
| 8,2                        | 0,61                     | 0,015          | 0,11            |
| 8,3                        | 0,50                     | 0,013          | 0,05            |
| 8,4                        | 0,35                     | 0,013          | 0,0             |
| 8,5                        | 0,27                     | 0,014          | 0,01            |
| 8,6                        | 0,25                     | 0,016          | 0,0             |
| 8,7                        | 0,14                     | 0,026          | —               |
| 8,8                        | 0,09                     | 0,021          | —               |
| 8,9                        | 0,07                     | 0,030          | —               |
| 9,0                        | 0,04                     | 0,027          | —               |
| 9,1                        | 0,04                     | 0,026          | —               |
| 9,2                        | 0,02                     | 0,017          | —               |
| 9,3                        | 0,01                     | 0,015          | —               |
| 9,5                        | 0,01                     | 0,002          | —               |

Таблица 18.17. Константа скорости диссоциативного прилипания электронов к молекулам в электрическом поле,  $10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$  [23—25]

| Молекула                  | $E/N, 10^{16} \text{ В см}^2$ |                     |       |       |      |      |      |     |      |     |      |     |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------|-------|-------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|
|                           | 0,2                           | 0,5                 | 1     | 5     | 10   | 15   | 20   | 25  | 30   | 40  | 50   | 60  |
| $\text{SF}_6$             | —                             | —                   | —     | 6,3   | 7    | 7,8  | 7,3  | 6,8 | 6,8  | 6,7 | 6,5  | 5,8 |
| $\text{CF}_4$             | —                             | —                   | —     | 0,39  | 0,68 | 0,68 | 0,64 | 0,5 | 0,46 | —   | —    | —   |
| $\text{C}_2\text{F}_6$    | —                             | —                   | —     | —     | —    | —    | —    | 2,7 | 2,6  | 1,5 | 0,65 | —   |
| $\text{C}_3\text{F}_8$    | —                             | —                   | —     | —     | —    | —    | —    | 3,0 | 2,4  | 1,8 | 1,0  | —   |
| $\text{C}_4\text{F}_{10}$ | —                             | —                   | —     | —     | —    | —    | —    | 3,3 | 2,3  | 1,0 | 0,6  | —   |
| $\text{CCl}_2\text{F}_2$  | —                             | —                   | —     | —     | —    | —    | —    | —   | 4,6  | 4,6 | 3,9  | 2,5 |
| $\text{H}_2\text{O}$      | —                             | —                   | —     | 0,017 | 0,8  | 1,0  | 0,78 | —   | —    | —   | —    | —   |
| $\text{N}_2\text{O}$      | $6,5 \cdot 10^{-6}$           | $1,2 \cdot 10^{-4}$ | 0,001 | —     | —    | —    | —    | —   | —    | —   | —    | —   |
| $\text{HCl}$              | 1,6                           | 2,6                 | —     | —     | —    | —    | —    | —   | —    | —   | —    | —   |
| $\text{HBr}$              | 34                            | —                   | —     | —     | —    | —    | —    | —   | —    | —   | —    | —   |
| $\text{HI}$               | 53                            | 26                  | —     | —     | —    | —    | —    | —   | —    | —   | —    | —   |

Таблица 18.18. Коэффициент диссоциативного прилипания электрона к молекулам в электрическом поле,  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с [23—25]

| Молекула                                            | Средняя энергия электронов, эВ |       |      |       |        |        |       |    |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|--------|--------|-------|----|
|                                                     | 0,25                           | 0,5   | 0,75 | 1     | 1,5    | 2      | 2,5   | 3  |
| CCl <sub>4</sub>                                    | 700                            | 450   | 350  | —     | —      | —      | —     | —  |
| CHCl <sub>3</sub>                                   | 150                            | 195   | 130  | 80    | —      | —      | —     | —  |
| CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>                     | 35                             | 90    | 120  | 110   | —      | —      | —     | —  |
| C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>                     | 40                             | 80    | 95   | 70    | —      | —      | —     | —  |
| 1-1-1-C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> | 44                             | 50    | 52   | 36    | —      | —      | —     | —  |
| 1-1-2-C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> | 16                             | 35    | 40   | 30    | —      | —      | —     | —  |
| CH <sub>3</sub> Br                                  | 0,48                           | 0,2   | 0,1  | 0,022 | 0,0075 | 0,0016 | —     | —  |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br                    | 0,19                           | 0,65  | 0,84 | 0,63  | 0,34   | 0,16   | 0,075 | —  |
| n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> Br                  | 0,23                           | 0,67  | 1,0  | 0,65  | 0,32   | 0,17   | 0,085 | —  |
| изо-C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Br                | 0,33                           | 0,85  | 1,2  | 0,75  | 0,40   | 0,18   | 0,12  | —  |
| изо-C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> Br               | 0,45                           | 1,0   | 1,4  | 0,8   | 0,42   | —      | —     | —  |
| изо-C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> Br               | 0,48                           | 1,2   | 1,5  | 0,9   | 0,5    | 0,3    | 0,2   | —  |
| цис-C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>                   | 320                            | 130   | 68   | 40    | —      | —      | —     | —  |
| 2-C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>                     | 370                            | 420   | 400  | 300   | —      | —      | —     | —  |
| 1,3-C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>                   | 570                            | 300   | 190  | 135   | —      | —      | —     | —  |
| цис-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>                   | 390                            | 350   | 260  | 170   | —      | —      | —     | —  |
| 2-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>                     | 300                            | 230   | 170  | 120   | —      | —      | —     | —  |
| цис-C <sub>5</sub> F <sub>8</sub>                   | 1000                           | 480   | 310  | 210   | —      | —      | —     | —  |
| цис-C <sub>6</sub> F <sub>10</sub>                  | 980                            | 480   | 300  | 200   | —      | —      | —     | —  |
| цис-C <sub>6</sub> F <sub>12</sub>                  | 940                            | 540   | 330  | 220   | —      | —      | —     | —  |
| C <sub>7</sub> F <sub>8</sub>                       | 1000                           | 540   | 330  | 220   | —      | —      | —     | —  |
| C <sub>8</sub> F <sub>16</sub>                      | 930                            | 540   | 330  | 220   | —      | —      | —     | —  |
| цис-C <sub>7</sub> F <sub>14</sub>                  | 200                            | 150   | 100  | 70    | —      | —      | —     | —  |
| цис-C <sub>7</sub> F <sub>14</sub>                  | 1200                           | 800   | 500  | 320   | —      | —      | —     | —  |
| CCl <sub>3</sub> F                                  | 500                            | 220   | 100  | —     | —      | —      | —     | —  |
| CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>                     | 15                             | 18    | 20   | 14    | —      | —      | —     | —  |
| CClF <sub>3</sub>                                   | —                              | 0,027 | 0,16 | 0,3   | —      | —      | —     | —  |
| CO <sub>2</sub>                                     | —                              | —     | —    | —     | 0,0003 | 0,0011 | 0,009 | —  |
| F                                                   | 130                            | 90    | 60   | 45    | 25     | 20     | 16    | 14 |
| Br <sub>2</sub>                                     | 0,65                           | 1,3   | 1,5  | —     | —      | —      | —     | —  |
| HBr                                                 | 4                              | 8,6   | 7,6  | 6,2   | 4,6    | —      | —     | —  |

Таблица 18.19. Константа скорости тройного прилипания электрона к молекуле ( $T = 300$  K)  $k$ ,  $10^{-31}$  см<sup>6</sup>/с [17]

| Третья частица          | $k$  | Третья частица | $k$  |
|-------------------------|------|----------------|------|
| Молекула O <sub>2</sub> |      |                |      |
| He                      | 0,45 | Xe             | 0,85 |
| Ne                      | 0,23 | H <sub>2</sub> | 4,8  |
| Ar                      | 0,5  | D <sub>2</sub> | 1,4  |
| Kr                      | 0,5  | N <sub>2</sub> | 1,1  |

Продолжение табл. 18.19

| Третья частица                | $k$ | Третья частица            | $k$  |
|-------------------------------|-----|---------------------------|------|
| H <sub>2</sub> O              | 143 | Молекула CO               |      |
| CO <sub>2</sub>               | 31  | CO                        | 2,7  |
| H <sub>2</sub> S              | 100 | Молекула N <sub>2</sub> O |      |
| NH <sub>3</sub>               | 75  | N <sub>2</sub> O          | 0,06 |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 25  | N <sub>2</sub>            | 0,03 |

Таблица 18.20. Константа скорости разрушения отрицательного иона при соударении с атомной частицей ( $T = 300$  K) [17]

| Реакция                                                | Дефект энергии, эВ | Константа скорости, $10^{-12}$ см <sup>3</sup> /с |
|--------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| H <sup>-</sup> + H → H <sub>2</sub> + e                | 3,8                | 1800                                              |
| H <sup>-</sup> + O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O + e | 1,25               | 1200                                              |
| H <sup>-</sup> + NO → HNO + e                          | 1,4                | 500                                               |

Продолжение табл. 18.20

| Реакция                                                | Дефект энергии, эВ | Константа скорости, $10^{-12}$ см <sup>3</sup> /с |
|--------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| H <sup>-</sup> + CO → HCO + e                          | 0,54               | 50                                                |
| O <sup>-</sup> + O → O <sub>2</sub> + e                | 3,6                | 200                                               |
| O <sup>-</sup> + N → NO + e                            | 5,1                | 200                                               |
| O <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O + e | 3,1                | 600                                               |
| O <sup>-</sup> + NO → NO <sub>2</sub> + e              | 1,4                | 200                                               |

| Реакция                                        | Дефект энергии, эВ | Константа скорости, $10^{-12}$ см <sup>3</sup> /с |
|------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| $O^- + CO \rightarrow CO_2 + e$                | 4,0                | 600                                               |
| $O^- + SO_2 \rightarrow SO_3 + e$              | 2,1                | 2000                                              |
| $O^- + C_2H_4 \rightarrow C_2H_4O + e$         | 1,2                | 800                                               |
| $O^- + O_2(^1\Delta_g) \rightarrow O_3 + e$    | 0,5                | 300                                               |
| $O_2^- + O_2 \rightarrow 2O_2 + e$             | -0,43              | $2,2 \cdot 10^{-6}$<br>0,63 (CCO K)               |
| $O_2^- + N_2 \rightarrow O_2 + N_2 + e$        | -0,43              | 0,00018<br>(600 K)                                |
| $O_2^- + O \rightarrow O_3 + e$                | 0,6                | 300                                               |
| $O_2^- + N \rightarrow NO_2 + e$               | 4,0                | 400                                               |
| $O_2^- + O_2(^1\Delta_g) \rightarrow 2O_2 + e$ | 0,6                | 200                                               |
| $Cl^- + H \rightarrow HCl + e$                 | 0,7                | 900                                               |
| $OH^- + O \rightarrow HO_2 + e$                | 0,9                | 200                                               |
| $OH^- + H \rightarrow H_2O + e$                | 3,2                | 1000                                              |
| $CN^- + H \rightarrow HCN + e$                 | 1,5                | 1000                                              |
| $S^- + O_2 \rightarrow SO_2 + e$               | 3,8                | 30                                                |
| $S^- + CO \rightarrow COS + e$                 | 1,6                | 300                                               |
| $C^- + CO \rightarrow C_2O + e$                | 2,0                | 400                                               |

| Реакция                                 | Дефект энергии, эВ | Константа скорости, $10^{-12}$ см <sup>3</sup> /с |
|-----------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| $C^- + CO \rightarrow 2CO + e$          | 4,3                | 500                                               |
| $C^- + N_2O \rightarrow CO + N_2 + e$   | 8,2                | 900                                               |
| $C^- + N_2O \rightarrow CN + NO + e$    | 1,6                |                                                   |
| $F^- + H \rightarrow HF + e$            | 2,5                | 1600                                              |
| $Cl^- + H \rightarrow HCl + e$          | 0,7                | 1000                                              |
| $I^- + H \rightarrow HI + e$            | ~0                 | 60                                                |
| $Cl^- + N \rightarrow ClN + e$          | 0,7                | 10                                                |
| $Cl^- + O \rightarrow ClO + e$          | 0,9                | 10                                                |
| $NO^- + He \rightarrow NO + He + e$     | -0,02              | 0,27                                              |
| $NO^- + He \rightarrow NO + He + e$     | -0,02              | 0,035                                             |
| $NO^- + H_2 \rightarrow NO + H_2 + e$   | -0,02              | 0,26                                              |
| $NO^- + NO \rightarrow 2NO + e$         | -0,02              | 6                                                 |
| $NO^- + CO \rightarrow NO + CO + e$     | -0,02              | 0,55                                              |
| $NO^- + N_2O \rightarrow NO + N_2O + e$ | -0,02              | 6,1                                               |
| $NO^- + CO_2 \rightarrow NO + CO_2 + e$ | -0,02              | 9,5                                               |
| $NO^- + NH_3 \rightarrow NO + NH_3 + e$ | -0,02              | 22                                                |
| $CN^- + H \rightarrow HCN + e$          | 1,0                | 800                                               |
| $HS^- + H \rightarrow H_2S + e$         | 1,7                | 1300                                              |

Таблица 18.21. Сечение тушения резонансно-возбужденных атомов щелочных металлов молекулами ( $T = 400 \div 500$  K),  $10^{-16}$  см<sup>2</sup> [14]

| Тушащая молекула | Na    | K           | K           | K     | Rb          |             | Cs          |             |
|------------------|-------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                  | $^2P$ | $^2P_{1/2}$ | $^2P_{3/2}$ | $^2P$ | $^3P_{1/2}$ | $^3P_{3/2}$ | $^2P_{1/2}$ | $^2P_{3/2}$ |
| N <sub>2</sub>   | 39    | 35          | 39          | 26    | 47          | 40          | 66          | 67          |
| H <sub>2</sub>   | 17    | 7           | 4           | 7     | 6           | 3           | 7           | 5           |
| HD               | 11    | 11          | 14          | 12    | 6           | 5           | 8           | 7           |
| D <sub>2</sub>   | 10    | 2           | 1           | 8     | 3           | 5           | 4           | 3           |
| CO               | 88    | —           | —           | —     | —           | —           | —           | —           |

Таблица 18.22. Сечение тушения резонансно-возбужденных атомов при соударении с молекулами в пламенах ( $T = 1400 \div 1800$  K),  $10^{-16}$  см<sup>2</sup> [4]

| Тушащая молекула | Li( $2^2P$ ) | Na( $3^2P$ ) | K( $4^2P$ ) | Rb( $5^2P$ ) | Cs( $6^2P$ ) | Tl( $7^2S$ ) | Rb( $7^2P_{1/2}$ ) |
|------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| H <sub>2</sub>   | 16,3         | 8,6          | 3,3         | 3,0          | 5,2          | 0,2          | 1,3                |
| N <sub>2</sub>   | 12,2         | 22           | 19          | 22           | 48           | 20           | 18                 |
| O <sub>2</sub>   | —            | 36           | 52          | 84           | —            | 41           | 47                 |
| CO               | 40           | 40           | 42          | 37           | —            | 43           | 41                 |
| CO <sub>2</sub>  | 29           | 51           | 67          | 75           | —            | 102          | 91                 |
| H <sub>2</sub> O | 6            | 2            | 2,9         | 4,0          | 13           | 5,5          | 25                 |
| D <sub>2</sub>   | —            | —            | —           | —            | —            | —            | —                  |

Таблица 18.23. Константа скорости тушения возбужденных атомов и молекул инертных газов при столкновениях с атомами и молекулами,  $10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с ( $T = 300$  K) [14]

| Тушащая частица | Ne ( $^3P_2$ ) | Ar ( $^3P_2$ ) | Ar ( $^3P_0$ ) | Kr ( $^3P_2$ ) | Xe ( $^3P_2$ ) | He <sub>2</sub> ( $^3\Sigma_u^+$ ) | Ar ( $^3P_1$ ) | Ar ( $^1P_1$ ) |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|----------------|----------------|
| He*             | —              | —              | —              | —              | —              | —                                  | —              | —              |
| Ne              | 0,00072        | —              | —              | —              | —              | 0,44                               | —              | —              |
| Ar              | —              | 0,00011        | 0,00057        | —              | —              | 3,1                                | —              | —              |
| Kr              | —              | —              | —              | —              | —              | —                                  | 0,9            | 0,1            |
| Xe              | —              | —              | —              | —              | 0,00023        | —                                  | 22             | 33             |

\* Константа скорости тушения процесса  $He(2^1S) + He(1^1S_0) \rightarrow 2He(1^1S_0)$  равна  $0,00036 \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с.

| Тушащая частица               | Ne ( $^3P_2$ ) | Ar ( $^3P_2$ ) | Ar ( $^3P_0$ ) | Kr ( $^3P_2$ ) | Xe ( $^3P_2$ ) | He ( $^3\Sigma_u^+$ ) | Ar ( $^3P_1$ ) | Ar ( $^1P_1$ ) |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|
| H <sub>2</sub>                | 5              | 8,7            | 7,8            | 3              | 1,6            | —                     | 20             | 25             |
| D <sub>2</sub>                | —              | 6,5            | 7,8            | 2,5            | —              | —                     | —              | —              |
| N <sub>2</sub>                | 8,4            | 3,6            | 1,6            | 0,4            | 1,9            | 3,0                   | 0,9            | 4,7            |
| O <sub>2</sub>                | —              | 17             | 24             | 16             | 22             | —                     | 25             | 31             |
| CO                            | 5,4            | 1,6            | 13             | 5,8            | 3,6            | 5,6                   | 5,0            | 9,0            |
| NO                            | —              | 20             | 25             | 19             | 27             | —                     | 35             | 56             |
| Cl <sub>2</sub>               | 41             | 71             | 72             | 73             | 72             | —                     | —              | —              |
| F <sub>2</sub>                | 41             | 75             | 90             | 72             | 75             | —                     | —              | —              |
| HCl                           | 17             | —              | —              | —              | —              | —                     | —              | —              |
| HI                            | —              | 75             | —              | —              | —              | —                     | —              | —              |
| HBr                           | —              | 52             | —              | —              | —              | —                     | —              | —              |
| CO <sub>2</sub>               | —              | 54             | 59             | 40             | 45             | 9,5                   | 50             | 74             |
| N <sub>2</sub> O              | 22             | 44             | 48             | 31             | 44             | —                     | 45             | 58             |
| NF <sub>3</sub>               | 7,8            | 14             | 7              | 12             | 9              | —                     | —              | —              |
| N <sub>2</sub> F <sub>4</sub> | 14             | 3              | —              | 33             | —              | —                     | —              | —              |
| CH <sub>4</sub>               | —              | 50             | 55             | 37             | 33             | 6,1                   | —              | —              |
| SF <sub>6</sub>               | —              | 27             | 17             | 18             | 23             | —                     | 63             | 65             |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | —              | —              | —              | —              | —              | —                     | 56             | 103            |

Таблица 18.24. Константа скорости тушения метастабильных атомов и молекул кислорода и азота при столкновениях,  $10^{-14}$  см<sup>3</sup>/с ( $T = 300$  К) [14]

| Тушащая частица  | O <sub>2</sub> ( $^1\Delta_g$ ) | O <sub>2</sub> ( $^1\Sigma_g^+$ ) | O ( $^1S$ )      | O ( $^1D$ )      | N ( $^2D$ ) | N ( $^2P$ ) | N <sub>2</sub> ( $A^2\Sigma_u^+$ ) |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|------------------------------------|
| Ar               | —                               | —                                 | 0,039            | —                | —           | 0,07        | —                                  |
| N <sub>2</sub>   | —                               | 0,23                              | —                | 6100             | 1,5         | 6           | —                                  |
| O <sub>2</sub>   | 0,00019                         | 0,02                              | 30               | 5400             | 690         | 6           | —                                  |
| H <sub>2</sub>   | 0,00027                         | 52                                | 0,058            | $2 \cdot 10^4$   | 290         | 0,19        | 0,27                               |
| D <sub>2</sub>   | 0,004                           | —                                 | —                | $1,5 \cdot 10^4$ | —           | —           | —                                  |
| NO               | 2500                            | 5                                 | $4 \cdot 10^4$   | $1,7 \cdot 10^4$ | 9200        | 3300        | 6600                               |
| CO               | —                               | 0,3                               | —                | 7000             | 405         | 90          | 440                                |
| CO <sub>2</sub>  | —                               | 19                                | 30               | 1900             | 43          | 0,12        | —                                  |
| N <sub>2</sub> O | —                               | —                                 | 940              | $1,3 \cdot 10^4$ | —           | —           | —                                  |
| H <sub>2</sub> O | —                               | 330                               | $4,2 \cdot 10^4$ | $1,2 \cdot 10^4$ | —           | —           | —                                  |
| O <sub>3</sub>   | 0,47                            | 1900                              | $6,9 \cdot 10^4$ | $1,9 \cdot 10^4$ | —           | —           | —                                  |

Таблица 18.25. Сечение тушения возбужденного атома Hg ( $6^3P_1$ ) при соударении с атомами и молекулами ( $T \approx 300$  К) [14]

| Тушащая частица                       | H <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO | CO <sub>2</sub> | Xe    |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|-----------------|-------|
| $\sigma$ , $10^{-16}$ см <sup>2</sup> | 22             | 22             | 57             | 0,9            | 19 | 9               | 0,002 |

## 18.8. ПРОЦЕССЫ ТУШЕНИЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Сечения и константы скорости этих процессов представлены в табл. 18.21—18.29. Погрешность приводимых данных достигает 50%.

Таблица 18.26. Константа скорости тушения некоторых электронно-возбужденных атомов, радикалов и молекул,  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с ( $T = 300$  K) [14, 22]

| Возбужденная частица                            | Тушащая частица      |                      |                      |                 |       |                 |                 |                 |                  |                  |                |
|-------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|
|                                                 | Ar                   | N <sub>2</sub>       | O <sub>2</sub>       | Cl <sub>2</sub> | CO    | CO <sub>2</sub> | CF <sub>4</sub> | SF <sub>6</sub> | CCl <sub>4</sub> | SiF <sub>4</sub> | D <sub>2</sub> |
| Ar (4d  3/2 )                                   | 1,9                  | 1,6                  | 1,3                  | 1,3             | 2,3   | 1,6             | 3,3             | 5,1             | 2,2              | 1,6              | —              |
| F (3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> )           | 0,4                  | 0,3                  | 0,3                  | 1,5             | 0,5   | 0,6             | 0,6             | 0,9             | 0,3              | 0,6              | —              |
| F (3p <sup>4</sup> D <sub>7/2</sub> )           | 1,2                  | 1,0                  | 0,8                  | 1,9             | 1,5   | 1,8             | 1,8             | 2,6             | 0,9              | 1,8              | —              |
| O (3p <sup>5</sup> P)                           | —                    | 2,0                  | 1,7                  | 3,7             | 3,0   | 3,5             | 4,2             | 4,8             | 3,1              | 3,1              | —              |
| CO (B <sup>1</sup> Σ)                           | 1,3                  | 1,1                  | 0,9                  | —               | 1,7   | 1,8             | 2,5             | 3,3             | 3,1              | 2,0              | —              |
| N <sub>2</sub> (C <sup>3</sup> π <sub>u</sub> ) | 0,4                  | 0,1                  | 0,3                  | —               | 0,6   | 0,6             | 0,9             | 1,1             | 1,0              | 0,7              | —              |
| CF <sub>2</sub> ( <sup>1</sup> B <sub>2</sub> ) | —                    | 0,2                  | —                    | —               | —     | —               | 0,05            | —               | —                | —                | —              |
| OH (A <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> )             | 0,22                 | —                    | —                    | —               | 3     | 1,3             | —               | —               | —                | —                | —              |
| CO (a <sup>3</sup> Π)                           | 1,8                  | 0,15                 | 1,5                  | —               | 12,6  | 0,16            | —               | —               | —                | —                | 1,6            |
| NH (b <sup>1</sup> Σ <sup>+</sup> )             | 2,5·10 <sup>-6</sup> | 4,5·10 <sup>-6</sup> | 2,4·10 <sup>-5</sup> | —               | —     | —               | —               | —               | —                | —                | —              |
| ND (b <sup>1</sup> Σ <sup>+</sup> )             | 5·10 <sup>-8</sup>   | 3,8·10 <sup>-7</sup> | —                    | —               | —     | —               | —               | —               | —                | —                | —              |
| CH (c <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> )             | —                    | 0,0007               | —                    | —               | 0,048 | —               | —               | —               | —                | —                | —              |

Продолжение табл. 18.26

| Возбужденная частица                            | Тушащая частица |                     |                 |                               |                    |                     |                |                 |                      |                  |                 |
|-------------------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------------|------------------|-----------------|
|                                                 | NO              | O ( <sup>3</sup> P) | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | He                 | N ( <sup>4</sup> S) | H <sub>2</sub> | NH <sub>3</sub> | ND <sub>3</sub>      | H <sub>2</sub> O | NO <sub>2</sub> |
| Ar (4d  3/2 )                                   | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| F (3p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> )           | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| F (3p <sup>4</sup> D <sub>7/2</sub> )           | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| O (3p <sup>5</sup> P)                           | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| CO (B <sup>1</sup> Σ)                           | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| N <sub>2</sub> (C <sup>3</sup> Π <sub>u</sub> ) | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| CF <sub>2</sub> ( <sup>1</sup> B <sub>2</sub> ) | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| OH (A <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> )             | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | 0,92           | —               | —                    | 5                | 3,5             |
| CO (a <sup>3</sup> Π)                           | 2,4             | 1,9                 | 3,1             | 5,9                           | —                  | —                   | —              | —               | —                    | —                | —               |
| NH (b <sup>1</sup> Σ <sup>+</sup> )             | —               | 0,18                | —               | —                             | 7·10 <sup>-7</sup> | 0,34                | 0,01           | 0,0039          | —                    | —                | —               |
| ND (b <sup>1</sup> Σ <sup>+</sup> )             | —               | —                   | —               | —                             | 5·10 <sup>-8</sup> | —                   | 0,009          | —               | 5,2·10 <sup>-4</sup> | —                | —               |
| CH (c <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> )             | —               | —                   | —               | —                             | —                  | —                   | —              | —               | —                    | 0,45             | —               |

Таблица 18.27. Константа скорости образования эксимерных молекул при парной реакции замещения,  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>/с ( $T = 300$  K) [26]

| Реакция                                                                       | Константа скорости |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Ar ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + F <sub>2</sub> → ArF* + F                | 9,0                |
| Ar ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + NF <sub>3</sub> → ArF* + NF <sub>2</sub> | 1,0                |
| Ar ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + Cl <sub>2</sub> + ArCl* + Cl             | 7,1                |
| Kr ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + F <sub>2</sub> → KrF* + F                | 6,2                |
| Kr ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + NF <sub>3</sub> → KrF* + NF <sub>2</sub> | 1,0                |
| Kr ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + OF <sub>2</sub> → KrF* + OF              | 5,3                |
| Kr ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + Cl <sub>2</sub> → KrCl* + Cl             | 7,3                |
| Xe ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + F <sub>2</sub> → XeF* + F                | 7,5                |
| Xe ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + NF <sub>3</sub> → XeF* + NF <sub>2</sub> | 0,9                |
| Xe ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + OF <sub>2</sub> → XeF* + OF              | 5,7                |
| Xe ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + Cl <sub>2</sub> → XeCl* + Cl             | 7,2                |
| Xe ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) + Br <sub>2</sub> → XeBr* + Br             | 10                 |

Таблица 18.28. Константа скорости  $k$  образования эксимерной молекулы при тройном столкновении  $A^* + B + C \rightarrow AB^* + C$ ,  $10^{-33}$  см<sup>6</sup>/с ( $T = 300$  K) [26]

| A*                                 | B  | C  | Эксимерная молекула | $k$         |
|------------------------------------|----|----|---------------------|-------------|
| He ( <sup>2</sup> 3S)              | He | He | He <sub>2</sub> *   | 0,23        |
| Ne ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) | Ne | Ne | Ne <sub>2</sub> *   | 0,5         |
| Ne ( <sup>3</sup> P <sub>0</sub> ) | Ne | Ne | Ne <sub>2</sub> *   | 0,07 (77 K) |
| Ne ( <sup>1</sup> P <sub>1</sub> ) | Ne | Ne | Ne <sub>2</sub> *   | 5,8         |
| Ar ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) | Ar | Ar | Ar <sub>2</sub> *   | 10          |
| Ar ( <sup>1</sup> P <sub>1</sub> ) | Ar | Ar | Ar <sub>2</sub> *   | 14          |
| Ar ( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> ) | Ar | Ar | Ar <sub>2</sub> *   | 12          |
| Kr ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> ) | Kr | Kr | Kr <sub>2</sub> *   | 36          |
| Kr ( <sup>3</sup> P <sub>0</sub> ) | Kr | Kr | Kr <sub>2</sub> *   | 54          |

| A*                 | B  | C      | Экцимерная молекула | k            |
|--------------------|----|--------|---------------------|--------------|
| Kr ( $^3P_1$ )     | Kr | Kr     | Kr $_2^*$           | 30           |
| Kr ( $^1P_1$ )     | Kr | Kr     | Kr $_2^*$           | 1,6          |
| Xe ( $^3P_2$ )     | Xe | Xe     | Xe $_2^*$           | 55           |
| Xe ( $^3P_0$ )     | Xe | Xe     | Xe $_2^*$           | 40           |
| Xe ( $^3P_1$ )     | Xe | Xe     | Xe $_2^*$           | 70           |
| Hg ( $^3P_0$ )     | Hg | Hg     | Hg $_2^*$           | 250 (470 K)  |
| Hg ( $^3P_1$ )     | Hg | Hg     | Hg $_2^*$           | 160          |
| Cs ( $6^2P$ )      | Cs | Xe     | Cs $_2^*$           | 4200 (620 K) |
| Xe ( $^3P_2$ )     | Xe | He     | Xe $_2^*$           | 160 (670 K)  |
| Xe ( $^3P_2$ )     | Xe | Ne     | Xe $_2^*$           | 14           |
| Xe ( $^3P_2$ )     | Xe | Ar     | Xe $_2^*$           | 26           |
| Kr ( $^3P_2$ )     | Ar | Ar     | KrAr*               | 1,0          |
| Xe ( $^3P_2$ )     | Ar | Ar     | XeAr*               | 0,7          |
| Hg ( $^3P_0$ )     | Hg | N $_2$ | Hg $_2^*$           | 1000 (430 K) |
| Hg $_2$ ( $O^+g$ ) | Hg | N $_2$ | Hg $_3^*$           | 200          |
| Ne ( $^1P_1$ )     | Ne | Ne     | Ne $_2^*$           | 5,8          |
| Ar ( $^3P_1$ )     | Ar | Ar     | Ar $_2^*$           | 12           |
| ArF ( $B_{1/2}$ )  | Ar | Ar     | Ar $_2$ F*          | 490          |
| KrF ( $B_{1/2}$ )  | Ar | Ar     | ArKrF*              | 90           |
| KrF ( $B_{1/2}$ )  | Kr | Ar     | Kr $_2$ F*          | 600          |
| KrF ( $B_{1/2}$ )  | Kr | Kr     | Kr $_2$ F*          | 600          |
| XeF ( $B_{1/2}$ )  | Xe | Ne     | Xe $_2$ F*          | 780          |
| XeF ( $B_{1/2}$ )  | Xe | Xe     | Xe $_2$ F*          | 260          |

Таблица 18.29. Константа скорости тушения  
эксимерных молекул  $k$ ,  $10^{-12}$  см $^3$ /с  
( $T = 300$  K) [26]

| Эксимерная молекула | Тушащая частица | k    | Эксимерная молекула | Тушащая частица | k   |
|---------------------|-----------------|------|---------------------|-----------------|-----|
| ArF ( $B_{1/2}$ )   | Ar              | 9    | KrF ( $B_{1/2}$ )   | Ar              | 5   |
|                     | Kr              | 1600 |                     | Kr              | 3,6 |
|                     | Xe              | 4500 |                     | F $_2$          | 650 |
|                     | F $_2$          | 1900 |                     | KrF             | 370 |
|                     |                 |      |                     | NF $_3$         | 52  |

| Эксимерная молекула   | Тушащая частица | k     | Эксимерная молекула   | Тушащая частица | k     |
|-----------------------|-----------------|-------|-----------------------|-----------------|-------|
| XeF ( $B_{1/2}$ )     | He              | 1,2   | HgBr ( $B_{1/2}$ )    | Kr              | 0,073 |
|                       | Ne              | 0,77  |                       | Xe              | 0,31  |
|                       | Ar              | 2,7   |                       | N $_2$          | 0,061 |
|                       | Xe              | 45    |                       | Cl $_2$         | 170   |
|                       | N $_2$          | 7,0   |                       | CCl $_4$        | 160   |
|                       | F $_2$          | 470   |                       | He              | 0,044 |
|                       | CO $_2$         | 250   |                       | Ar              | 0,072 |
| XeF ( $C_{3/2}$ )     | XeF             | 305   | XeI ( $B_{1/2}$ )     | Xe              | 0,31  |
|                       | NF $_3$         | 18    |                       | N $_2$          | 0,13  |
|                       | He              | 0,12  |                       | Br $_2$         | 290   |
|                       | Ne              | 0,3   |                       | HBr             | 130   |
|                       | Ar              | 0,09  |                       | CF $_3$ Br      | 87    |
|                       | Xe              | 1,0   |                       | CCl $_3$ Br     | 180   |
|                       | N $_2$          | 0,4   | XeCl ( $B_{1/2}$ )    | Ar              | 0,11  |
| XeBr ( $B_{1/2}$ )    | F $_2$          | 80    |                       | Xe              | 0,22  |
|                       | XeF $_2$        | 240   |                       | CF $_3$ I       | 290   |
|                       | NF $_3$         | 16    | XeI ( $C_{3/2}$ )     | He              | 3,8   |
| XeI ( $B_{1/2}$ )     | Ne              | 1,0   |                       | Ne              | 5,1   |
|                       | Xe              | 32    |                       | Ar              | 16    |
|                       | HCl             | 1400  |                       | Xe              | 41    |
| HgCl ( $B_{1/2}$ )    | Br $_2$         | 800   | Ar $_2$ F ( $^2B_2$ ) | N $_2$          | 24    |
|                       | Xe              | 9     |                       | He              | 0,005 |
|                       | I $_2$          | 500   |                       | Ar              | 0,022 |
|                       | CH $_3$ I       | 360   |                       | F $_2$          | 210   |
| Kr $_2$ F ( $^2B_2$ ) | He              | 0,041 | Kr $_2$ F ( $^2B_2$ ) | NF $_3$         | 300   |
|                       | Ne              | 0,033 |                       | F $_2$          | 880   |
|                       | Ar              | 0,05  |                       |                 |       |

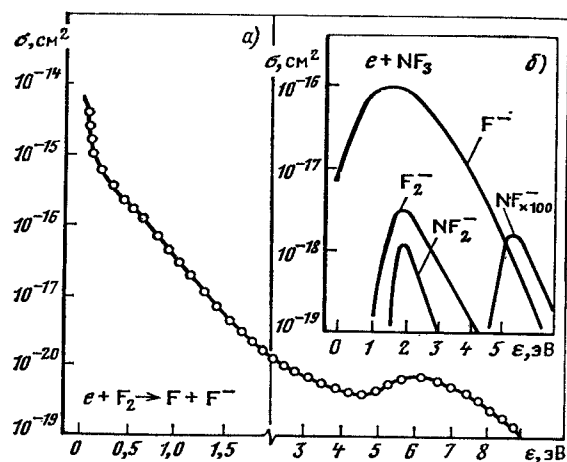
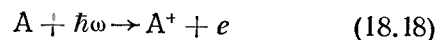


Рис. 18.4. Сечение диссоциативного прилипания электрона к молекуле F $_2$ (a) и NF $_3$  (b) [23]

## 18.9. ФОТОИОНИЗАЦИЯ И ФОТОРЕКОМБИНАЦИЯ

При фотоионизации



энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или молекулы, содержится в излучении. Сечение фото-



ионизации атомов вблизи порога не зависит от энергии фотона, поэтому пороговое значение сечения фотоионизации служит основной характеристикой этого процесса, используемой при описании явлений в низкотемпературной плазме. На рис. 18.5 показана зависимость сечения фотоионизации атома гелия от длины волны налетающего фотона [28]

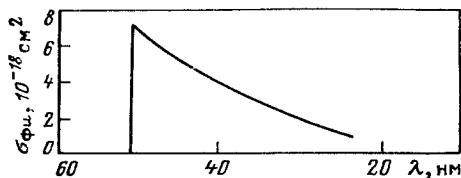


Рис. 18.5. Зависимость сечения фотоионизации атома гелия от длины волны падающего излучения [28]

Таблица 18.30. Пороговые значения сечения фотоионизации некоторых атомов [28]

| Атом | Пороговая длина волны, нм | Сечение, $10^{-18}$ см <sup>2</sup> |
|------|---------------------------|-------------------------------------|
| H    | 91,2                      | 6,3                                 |
| He   | 50,4                      | 7,4                                 |
| Li   | 230                       | 2,5                                 |
| Be   | 133                       | 8,2                                 |
| B    | 149                       | 19                                  |
| C    | 110                       | 11                                  |
| N    | 85,2                      | 9                                   |
| O    | 91                        | 2,6                                 |
| F    | 71,3                      | 6                                   |
| Ne   | 57,5                      | 4                                   |
| Na   | 241,2                     | 0,12                                |
| Mg   | 162                       | 1,2                                 |
| Ar   | 78,7                      | 35                                  |
| K    | 286,0                     | 0,012                               |
| Ca   | 202,8                     | 0,45                                |
| Ga   | 207                       | 0,2                                 |
| Kr   | 84,5                      | 35                                  |
| Rb   | 297                       | 0,11                                |
| In   | 214                       | 0,3                                 |
| Cs   | 318,5                     | 0,22                                |
| Tl   | 203                       | 4,5                                 |

В табл. 18.30 приведены пороговые значения сечения фотоионизации атомов [29].

Сечение фотоионизации атома водорода фотонами, энергия которых много больше энергии связи электрона в атоме (13,6 эВ), дается следующим выражением [31], см<sup>2</sup>:

$$\sigma_{\phi n} = 23,8 \lambda^{7/2}, \quad (18.19)$$

где  $\lambda$  — длина волны налетающего фотона, см. Сечение фотоионизации сильновозбужденного атома, см<sup>2</sup>, с эффективным значением главного квантового числа  $n^*$  дается формулой Крамерса [30]

$$\sigma_{\phi n} = 0,022 \lambda^3 / n^{*5}. \quad (18.20)$$

Процессом, обратным процессу фотоионизации

(18.18), является фоторекомбинация. Сечение фоторекомбинации электрона и иона в высоковозбужденное состояние атома, см<sup>2</sup>, с эффективным значением главного квантового числа  $n^*$  описывается соотношением, которое следует из формулы Крамерса (18.20),

$$\sigma_{\text{фр}} = \frac{2 \cdot 10^{-16} \lambda}{\epsilon n^{*3}}, \quad (18.21)$$

где  $\epsilon$  — энергия электрона, эВ. На рис. 18.6 представлена температурная зависимость коэффициента фоторекомбинации электрона и протона в водородной плазме [32]

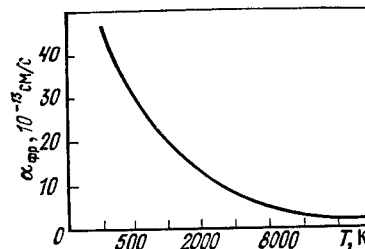


Рис. 18.6. Температурная зависимость коэффициента фоторекомбинации электрона и протона в водородной плазме [32]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованной плазме. М.: Атомиздат, 1975.
2. Елецкий А. В. // Успехи физ. наук. 1981. Т. 134. С. 237—266.
3. Rich J. W. // Appl. Atomic Collision Physics. Vol. 3. Gas Lasers, N. Y.: Academ. Press, 1982. P. 99—140.
4. Andrews A. J., Simpson C. J. S. M. // Chem. Phys. Lett., 1975, Vol. 36. P. 271—275.
5. Drosdoski W. S. e. a. // J. Chem. Phys. 1976. Vol. 65. P. 1542—1551.
6. Bohringer H. e. a. // Ibid. 1983. Vol. 79. P. 420—429.
7. Wilkins R. L. // Ibid. 1975. Vol. 63. P. 534—540.
8. Macdonald R. G., Moore C. B. // Ibid. 1980. Vol. 73. P. 1681—1690.
9. Wilkins R. L., Kwok M. A. // Ibid. 1980. Vol. 73. P. 3198—3206.
10. Dzelkalns L. S., Kaufman F. // Ibid. 1983. Vol. 79. P. 3836—3847.
11. Смирнов Б. М. // Успехи физ. наук. 1981. Т. 133. С. 569—592.
12. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. // Основы физики плазмы / Под ред. Р. З. Сагдеева и М. Розенблюта. М.: Энергоатомиздат, 1983. Т. 1. С. 58.
13. Ключарев А. Н., Безуглов Н. Н. Процессы возбуждения и ионизации атомов при поглощении света. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
14. Смирнов Б. М. Возбужденные атомы. М.: Энергоатомиздат, 1982.
15. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. // Успехи физ. наук. 1982. Т. 136. С. 25—57.
16. Mitchel J. B. A., McGowan P. W. // Physics of Ion—Ion and Electron—Ion Collisions. N. Y., Lond.: Plenum Press. 1983. P. 279—344.
17. Смирнов Б. М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978; Смирнов Б. М. Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М.: Атомиздат, 1973.
18. Smith D., Adams N. G. // Physics of Ion—ion and

Electron—Ion Collisions, N. Y., Lond.: Plenum Press. 1983. P. 501—548.

19. Flannery M. R.//Appl. Atomic Collision Physics. Vol. 3. Gas Lasers. N. Y.: Academ. Press. 1982. P. 141—184.

20. Думан Е. Л. и др. Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова № 3532/12, 1982.

21. Смирнов Б. М.//Успехи физ. наук. 1977. Т. 121. С. 231—259.

22. Словецкий Д. И.//Химия плазмы/Под ред. Б. М. Смирнова, М.: Энергоатомиздат. 1983. Вып. 10. С. 108—144.

23. Chantry P. J.//Applied Atomic Collision Physics. Gas Lasers. N. Y.: Academ. Press. 1982. Vol. 3. P. 35—97.

24. Orient O. J., Srivastava S. K.//J. Chem. Phys. 1983. Vol. 78. P. 2949—2957.

25. Gallagher J. W. e. a.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1983. Vol. 12. P. 109—143.

26. Смирнов Б. М.//Успехи физ. наук. 1983. Т. 139. С. 53—89.

27. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах: Пер. с англ. М.: Мир. 1977. Гл. 14.

28. Weissler G. L.//Handbuch der Physik. Bd XXI. Berlin: Springer. 1956.

29. Хастед Дж. Физика атомных столкновений: Пер. с англ. М.: Мир. 1965.

30. Kramers H. A.//Phil. Mag. 1923. Vol. 46. P. 836—848.

31. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Релятивистская квантовая теория. М.: Наука, 1968. Ч. 1. С. 234.

32. Бейтс Д., Далгарно А.//Атомные и молекулярные процессы/Под ред. Д. Бейтса; Пер. с англ. М.: Мир. 1964. С. 227—255.

## ГЛАВА 19

# ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

А. А. Радциг, В. М. Шустряков

### 19.1. ВВЕДЕНИЕ

Круг процессов, охватывающих ионизацию веществ, крайне широк и разнообразен. В различных ситуациях может представить интерес ионизация атомов и молекул вещества под действием падающих заряженных и нейтральных частиц, фотонов, наложенного внешнего поля и др. Не делая попытки отразить это многообразие процессов, мы представим ниже достаточно полную информацию о важнейшей пороговой характеристике рассматриваемого процесса — потенциале ионизации атомов, атомных ионов и молекул — и приведем данные о сечении ионизации атомов и молекул электронами, т. е. ограничим свое рассмотрение наиболее распространенным способом образования ионов и электронов в плазме.

Кроме того, будет представлена информация об энергии связи электронов в отрицательных ионах и энергии, высвобождающейся при присоединении протона к атомной или молекулярной частице. Наконец, подробно рассмотрим вопрос об энергии связи электронов во внутренних оболочках атомных частиц.

Отметим также, что процессы фотоионизации атомов и молекул и процессы пеннинговской и ассоциативной ионизации атомных частиц при столкновениях с возбужденными атомами затронуты в гл. 18.

### 19.2. ПОТЕНЦИАЛ ИОНИЗАЦИИ АТОМНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЧАСТИЦ

Потенциалом ионизации частицы называют ту минимальную энергию, которая затрачивается на перевод ее валентного электрона в непрерывный спектр. В табл. 19.1 представлены значения потенциала ионизации нейтральных атомных частиц, полученные главным образом в результате экстраполяции к границе непрерывного спектра атома серий оптических переходов, инициируемых с помощью различных источников возбуждения. При этом либо находят предельное значение известной функции (например, формулы Ритца), аппроксимирующей высоковозбужденные (ридберговские) уровни энергии атомной частицы, либо сравнивают реальные уровни с водородоподобными, внося поправки на поляризацию атомного остова [1]. Поэтому помимо потенциала ионизации атома, эВ, приведены также предельные значения для серий оптических переходов, см<sup>-1</sup>, отсчитанные от уровня основ-

ного состояния атома. Кроме того, часть данных была получена методами измерения порога фотоионизации, фотоэлектронной спектроскопии и лазерной спектроскопии ридберговских состояний атомов, а также расчетом (водород и его изотопы). В отдельной графе табл. 19.1 указаны конфигурация валентной электронной оболочки и электронный терм основного состояния атома. Основная информация о потенциалах ионизации атомов представлена в [2—6].

В табл. 19.2 собраны данные о потенциале ионизации легких и средних атомных ионов, характеризующие все ступени ионизации ионов с зарядом ядра  $Z \leq 36$  и представляющие интерес для физики высокотемпературной плазмы. Большая часть данных для низких степеней ионизации ионов была получена на основе обработки наблюдаемых спектров оптических переходов при высоких уровнях возбуждения частиц, тогда как в случае многократной ионизации использовались различные приемы экстраполяции потенциалов вдоль изоэлектронных серий [2,5,6]. В табл. 19.3 приведены значения потенциала ионизации одно-, двух- и трехзарядных атомных ионов с  $37 \leq Z \leq 92$ , найденные в основном исходя из пределов схождения линий в атомных спектрах [2,3,5,6]. Погрешности в определении искоемых значений потенциалов ионизации атомных частиц в табл. 19.1—19.3 были учтены нами при округлении значащих цифр в пределах  $\pm 1$  для последней приведенной цифры.

Информация о потенциале ионизации молекул включена в табл. 19.4. В этом случае минимальная энергия отвечает переходу между нулевыми колебательными уровнями основных электронных состояний молекулы и молекулярного иона и может быть названа адиабатическим потенциалом ионизации молекулы. Основными методами экспериментального определения потенциалов ионизации молекул служат методы электронного удара, фотоионизации и спектроскопического определения предела ридберговских серий в полосатых спектрах молекул. Чтобы дать представление о точности измерения значений  $IP$  для молекул, мы сгруппировали числовые данные по четырем классам точности:  $A$  — погрешность  $\leq 1\%$ ;  $B$  —  $\leq 3\%$ ;  $C$  —  $\leq 10\%$  и, наконец,  $D$  —  $\leq 30\%$ , в соответствии с оценкой использованного метода их получения. Представленные в табл. 19.4 данные основаны на материале монографий [7,8] и многочисленных журнальных публикациях последнего десятилетия.

Таблица 19.1. Потенциал ионизации атомов

| Атомный номер Z | Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)                | Оптический предел, см <sup>-1</sup> ; потенциал ионизации, эВ | Атомный номер Z | Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)                | Оптический предел, см <sup>-1</sup> ; потенциал ионизации, эВ |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1               | H<br>(1s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                                | 109678,774<br>13,5985                                         | 27              | Co<br>(3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub> ) | 63 400<br>7,86                                                |
|                 | D<br>(1s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                                | 109708,671<br>13,6022                                         | 28              | Ni<br>(3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> — <sup>3</sup> F <sub>4</sub> )   | 61 600<br>7,637                                               |
|                 | T<br>(1s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                                | 109718,546<br>13,6035                                         | 29              | Cu<br>(4s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                               | 62317,4<br>7,7264                                             |
| 2               | <sup>4</sup> He<br>(1s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )      | 198310,77<br>24,5876                                          | 30              | Zn<br>(4s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 75769,3<br>9,3943                                             |
|                 | <sup>3</sup> He<br>(1s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )      | 198300,3<br>24,5863                                           | 31              | Ga<br>(4p— <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> )                               | 48387,63<br>5,99930                                           |
| 3               | Li<br>(2s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                               | 43487,15<br>5,3918                                            | 32              | Ge<br>(4p <sup>2</sup> — <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )                   | 63713,2<br>7,8995                                             |
| 4               | Be<br>(2s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 75192,6<br>9,32270                                            | 33              | As<br>(4p <sup>3</sup> — <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> )                 | 78 950<br>9,789                                               |
| 5               | B<br>(2p— <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> )                                | 66928,1<br>8,2981                                             | 34              | Se<br>(4p <sup>4</sup> — <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )                   | 78658,2<br>9,752                                              |
| 6               | C<br>(2p <sup>2</sup> — <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )                    | 90820,4<br>11,260                                             | 35              | Br<br>(4p <sup>5</sup> — <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> )                 | 95284,8<br>11,814                                             |
| 7               | N<br>(2p <sup>3</sup> — <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> )                  | 117225,7<br>14,53414                                          | 36              | Kr<br>(4p <sup>6</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 112914,5<br>13,9997                                           |
| 8               | O<br>(2p <sup>4</sup> — <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )                    | 109837,0<br>13,618                                            | 37              | Rb<br>(5s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                               | 33690,88<br>4,17717                                           |
| 9               | F<br>(2p <sup>5</sup> — <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> )                  | 140524,5<br>17,423                                            | 38              | Sr<br>(5s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 45932,1<br>5,69490                                            |
| 10              | Ne<br>(2p <sup>6</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 173929,7<br>21,565                                            | 39              | Y<br>(4d5s <sup>2</sup> — <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> )                | 50 144<br>6,217                                               |
| 11              | Na<br>(3s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                               | 41449,4<br>5,13907                                            | 40              | Zr<br>(4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> — <sup>3</sup> F <sub>2</sub> )   | 53 506<br>6,634                                               |
| 12              | Mg<br>(3s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 61671,0<br>7,6463                                             | 41              | Nb<br>(4d <sup>4</sup> 5s— <sup>6</sup> D <sub>1/2</sub> )               | 54 514<br>6,759                                               |
| 13              | Al<br>(3p— <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> )                               | 48278,42<br>5,9858                                            | 42              | Mo<br>(4d <sup>5</sup> 5s— <sup>7</sup> S <sub>3</sub> )                 | 57 204<br>7,0924                                              |
| 14              | Si<br>(3p <sup>2</sup> — <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )                   | 65747,8<br>8,1517                                             | 43              | Tc<br>(4d <sup>6</sup> 5s <sup>2</sup> — <sup>6</sup> S <sub>5/2</sub> ) | 58 700<br>7,28                                                |
| 15              | P<br>(3p <sup>3</sup> — <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> )                  | 84580,8<br>10,4868                                            | 44              | Ru<br>(4d <sup>7</sup> 5s— <sup>5</sup> F <sub>6</sub> )                 | 59 410<br>7,366                                               |
| 16              | S<br>(3p <sup>4</sup> — <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )                    | 83559,3<br>10,36004                                           | 45              | Rh<br>(4d <sup>8</sup> 5s— <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub> )               | 60 200<br>7,46                                                |
| 17              | Cl<br>(3p <sup>5</sup> — <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> )                 | 104 591<br>12,968                                             | 46              | Pd<br>(4d <sup>10</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                  | 67 236<br>8,336                                               |
| 18              | Ar<br>(3p <sup>6</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 127109,8<br>15,760                                            | 47              | Ag<br>(5s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                               | 61106,6<br>7,5763                                             |
| 19              | K<br>(4s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                                | 35009,81<br>4,34070                                           | 48              | Cd<br>(5s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 72540,1<br>8,9939                                             |
| 20              | Ca<br>(4s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 49306,0<br>6,1132                                             | 49              | In<br>(5s <sup>2</sup> 5p— <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> )               | 46670,11<br>5,7864                                            |
| 21              | Sc<br>(3d4s <sup>2</sup> — <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> )               | 52 922<br>6,5615                                              | 50              | Sn<br>(5p <sup>2</sup> — <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )                   | 59232,7<br>7,3440                                             |
| 22              | Ti<br>(3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> — <sup>3</sup> F <sub>2</sub> )   | 55 000<br>6,82                                                | 51              | Sb<br>(5p <sup>3</sup> — <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> )                 | 69431,4<br>8,60840                                            |
| 23              | V<br>(3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> )  | 54 360<br>6,74                                                | 52              | Te<br>(5p <sup>4</sup> — <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )                   | 72 670<br>9,010                                               |
| 24              | Cr<br>(3d <sup>5</sup> 4s— <sup>7</sup> S <sub>3</sub> )                 | 54 570<br>6,766                                               | 53              | I<br>(5p <sup>5</sup> — <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> )                  | 84295,0<br>10,451                                             |
| 25              | Mn<br>(3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> — <sup>6</sup> S <sub>5/2</sub> ) | 59959,4<br>7,43402                                            | 54              | Xe<br>(5p <sup>6</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                   | 97833,8<br>12,1299                                            |
| 26              | Fe<br>(3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> — <sup>5</sup> D <sub>4</sub> )   | 63 740<br>7,9024                                              | 55              | Cs<br>(6s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                               | 31406,47<br>3,89391                                           |

| Атомный номер<br>Z | Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)                               | Оптический предел, см <sup>-1</sup> ; потенциал ионизации, эВ | Атомный номер<br>Z | Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)                               | Оптический предел, см <sup>-1</sup> ; потенциал ионизации, эВ |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 56                 | Ba<br>(6s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                                  | 42034,90<br>5,21166                                           | 80                 | Hg<br>(6s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                                  | 84184,1<br>10,4376                                            |
| 57                 | La<br>(5d6s <sup>2</sup> — <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> )                              | 44 980<br>5,577                                               | 81                 | Tl<br>(6s <sup>2</sup> 6p— <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> <sup>0</sup> )                 | 49266,7<br>6,1083                                             |
| 58                 | Ce<br>(4f5d6s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> G <sub>4</sub> <sup>0</sup> )                 | 44 670<br>5,539                                               | 82                 | Pb<br>(6p <sup>3</sup> — <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )                                  | 59819,6<br>7,4167                                             |
| 59                 | Pr<br>(4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub> <sup>0</sup> )   | 44 100<br>5,47                                                | 83                 | Bi<br>(6p <sup>3</sup> — <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> <sup>0</sup> )                   | 58 762<br>7,2853                                              |
| 60                 | Nd<br>(4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>5</sup> I <sub>4</sub> )                  | 44 560<br>5,525                                               | 84                 | Po<br>(6p <sup>4</sup> — <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )                                  | 67885,3<br>8,4168                                             |
| 61                 | Pm<br>(4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>6</sup> H <sub>5/2</sub> <sup>0</sup> )   | 45 000<br>5,58                                                | 85                 | At<br>(6p <sup>5</sup> — <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> <sup>0</sup> )                   | —<br>9,0                                                      |
| 62                 | Sm<br>(4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>7</sup> F <sub>0</sub> )                  | 45 520<br>5,644                                               | 86                 | Rn<br>(6p <sup>6</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                                  | 86 692<br>10,75                                               |
| 63                 | Eu<br>(4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>8</sup> S <sub>7/2</sub> <sup>0</sup> )   | 45 735<br>5,6704                                              | 87                 | Fr<br>(7s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                                              | 32848<br>4,073                                                |
| 64                 | Gd<br>(4f <sup>7</sup> 5d6s <sup>2</sup> — <sup>9</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )   | 49 603<br>6,150                                               | 88                 | Ra<br>(7s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                                  | 42573,4<br>5,2785                                             |
| 65                 | Tb<br>(4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>6</sup> H <sub>15/2</sub> <sup>0</sup> )  | 47 300<br>5,864                                               | 89                 | Ac<br>(6d7s <sup>2</sup> — <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> )                              | 42 000<br>5,2                                                 |
| 66                 | Dy<br>(4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>5</sup> I <sub>8</sub> )                 | 47 900<br>5,939                                               | 90                 | Th<br>(6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>3</sup> F <sub>2</sub> )                  | 49 000<br>6,1                                                 |
| 67                 | Ho<br>(4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub> <sup>0</sup> ) | 48 570<br>6,022                                               | 91                 | Pa<br>(5f <sup>2</sup> 6d7s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> K <sub>11/2</sub> )             | 47 000<br>6,0                                                 |
| 68                 | Er<br>(4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>3</sup> H <sub>6</sub> )                 | 49 260<br>6,108                                               | 92                 | U<br>(5f <sup>3</sup> 6d7s <sup>2</sup> — <sup>5</sup> L <sub>6</sub> <sup>0</sup> )    | 49 960<br>6,194                                               |
| 69                 | Tm<br>(4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>2</sup> F <sub>7/2</sub> <sup>0</sup> )  | 49 880<br>6,184                                               | 93                 | Np<br>(5f <sup>4</sup> 6d7s <sup>2</sup> — <sup>6</sup> L <sub>11/2</sub> )             | 50 540<br>6,266                                               |
| 70                 | Yb<br>(4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                 | 50 441<br>6,254                                               | 94                 | Pu<br>(5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>7</sup> F <sub>0</sub> )                  | 49 000<br>6,06                                                |
| 71                 | Lu<br>(4f <sup>14</sup> 5d6s <sup>2</sup> — <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> )             | 43762,4<br>5,426                                              | 95                 | Am<br>(5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>8</sup> S <sub>7/2</sub> <sup>0</sup> )   | 48 300<br>6,0                                                 |
| 72                 | Hf<br>(5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>3</sup> F <sub>2</sub> )                  | 55 600<br>6,8                                                 | 96                 | Cm<br>(5f <sup>7</sup> 6d7s <sup>2</sup> — <sup>9</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )   | 48 600<br>6,02                                                |
| 73                 | Ta<br>(5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> )                | 63 600<br>7,89                                                | 97                 | Bk<br>(5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>6</sup> H <sub>15/2</sub> <sup>0</sup> )  | 50 200<br>6,23                                                |
| 74                 | W<br>(5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>5</sup> D <sub>0</sub> )                   | 64 000<br>7,98                                                | 98                 | Cf<br>(5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>5</sup> I <sub>8</sub> )                 | 50 800<br>6,30                                                |
| 75                 | Re<br>(5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>6</sup> S <sub>5/2</sub> )                | 64 000<br>7,88                                                | 99                 | Es<br>(5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub> <sup>0</sup> ) | 51 800<br>6,42                                                |
| 76                 | Os<br>(5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>5</sup> D <sub>4</sub> )                  | 70 450<br>8,73                                                | 100                | Fm<br>(5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>3</sup> H <sub>6</sub> )                 | 52 000<br>6,5                                                 |
| 77                 | Ir<br>(5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> — <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub> )                | 73 000<br>9,05                                                | 101                | Md<br>(5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>2</sup> F <sub>7/2</sub> <sup>0</sup> )  | 53 000<br>6,6                                                 |
| 78                 | Pt<br>(5d <sup>9</sup> 6s— <sup>3</sup> D <sub>3</sub> )                                | 72 300<br>8,96                                                | 102                | No<br>(5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> — <sup>1</sup> S <sub>0</sub> )                 | 54 000<br>6,6                                                 |
| 79                 | Au<br>(5d <sup>10</sup> 6s— <sup>2</sup> S <sub>1/2</sub> )                             | 74409,0<br>9,2256                                             |                    |                                                                                         |                                                               |

Таблица 19.2. Потенциал ионизации атомных ионов ( $2 \leq Z \leq 36$ ), эВ ( $X^{\zeta}$  — спектроскопический символ иона, где  $\zeta = Z - N + 1$ ,  $N$  — число электронов в системе)

| Атомный номер $Z$ | Элемент $X$ | $\zeta$ |         |        |        |         |        |
|-------------------|-------------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|
|                   |             | II      | III     | IV     | V      | VI      | VII    |
| 2                 | He          | 54,418  |         |        |        |         |        |
| 3                 | Li          | 75,641  | 122,45  |        |        |         |        |
| 4                 | Be          | 18,211  | 153,90  | 217,72 |        |         |        |
| 5                 | B           | 25,155  | 37,931  | 259,38 | 340,23 |         |        |
| 6                 | C           | 24,384  | 47,89   | 64,49  | 392,09 | 490,00  |        |
| 7                 | N           | 29,602  | 47,45   | 77,47  | 97,891 | 552,07  | 667,05 |
| 8                 | O           | 35,118  | 54,936  | 77,414 | 113,90 | 138,12  | 739,34 |
| 9                 | F           | 34,971  | 62,71   | 87,14  | 114,24 | 157,164 | 185,19 |
| 10                | Ne          | 40,963  | 63,46   | 97,12  | 126,2  | 157,9   | 207,28 |
| 11                | Na          | 47,287  | 71,620  | 98,92  | 138,40 | 172,2   | 208,5  |
| 12                | Mg          | 15,035  | 80,144  | 109,27 | 141,27 | 186,5   | 224,9  |
| 13                | Al          | 18,829  | 28,448  | 119,99 | 153,83 | 198,48  | 241,44 |
| 14                | Si          | 16,346  | 33,493  | 45,142 | 166,77 | 205,3   | 246,5  |
| 15                | P           | 19,770  | 30,2026 | 51,444 | 65,026 | 220,42  | 263,6  |
| 16                | S           | 23,338  | 34,83   | 47,305 | 72,7   | 88,05   | 280,9  |
| 17                | Cl          | 23,814  | 39,61   | 53,47  | 67,8   | 97,0    | 114,20 |
| 18                | Ar          | 27,630  | 40,911  | 59,81  | 75,0   | 91,01   | 124,32 |
| 19                | K           | 31,63   | 45,81   | 60,91  | 82,7   | 99,4    | 117,6  |
| 20                | Ca          | 11,872  | 50,913  | 67,3   | 84,5   | 108,8   | 127,2  |
| 21                | Sc          | 12,800  | 24,757  | 73,49  | 91,7   | 110,7   | 138,0  |
| 22                | Ti          | 13,58   | 27,49   | 43,27  | 99,30  | 119,53  | 140,8  |
| 23                | V           | 14,66   | 29,31   | 46,71  | 65,28  | 128,1   | 150,6  |
| 24                | Cr          | 16,50   | 31,0    | 49,2   | 69,5   | 90,64   | 160,2  |
| 25                | Mn          | 15,640  | 33,67   | 51,2   | 72,4   | 95      | 119,3  |
| 26                | Fe          | 16,188  | 30,65   | 54,8   | 75     | 99      | 124,88 |
| 27                | Co          | 17,084  | 33,5    | 51,3   | 79,5   | 102     | 129    |
| 28                | Ni          | 18,169  | 35,3    | 54,9   | 76     | 108     | 133    |
| 29                | Cu          | 20,293  | 36,84   | 57,4   | 80     | 103     | 139    |
| 30                | Zn          | 17,964  | 39,72   | 59,57  | 83     | 108     | 134    |
| 31                | Ga          | 20,515  | 30,726  | 64,2   | 90     | 117     | 147    |
| 32                | Ge          | 15,935  | 34,2    | 45,715 | 93,5   | 120     | 151    |
| 33                | As          | 18,59   | 28,4    | 50,1   | 62,6   | 128     | 154    |
| 34                | Se          | 21,16   | 30,82   | 42,95  | 68     | 81,7    | 155,33 |
| 35                | Br          | 21,81   | 35,90   | 47,3   | 59,7   | 88,6    | 103    |
| 36                | Kr          | 24,360  | 36,95   | 52,5   | 65     | 78,5    | 111    |

Продолжение табл. 19.2

| Атомный номер $Z$ | Элемент $X$ | $\zeta$ |         |         |         |         |        |        |
|-------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
|                   |             | VIII    | IX      | X       | XI      | XII     | XIII   | XIV    |
| 8                 | O           | 871,42  |         |         |         |         |        |        |
| 9                 | F           | 953,91  | 1103,13 |         |         |         |        |        |
| 10                | Ne          | 239,10  | 1195,8  | 1362,21 |         |         |        |        |
| 11                | Na          | 264,2   | 299,87  | 1465,1  | 1648,71 |         |        |        |
| 12                | Mg          | 266,0   | 328,2   | 367,5   | 1761,8  | 1962,68 |        |        |
| 13                | Al          | 284,60  | 330,1   | 399,4   | 442,0   | 2086,0  | 2304,2 |        |
| 14                | Si          | 303,5   | 351,1   | 401,4   | 476,4   | 523,4   | 2437,7 | 2673,2 |
| 15                | P           | 309,6   | 372,1   | 424,4   | 479,5   | 560,8   | 611,7  | 2816,9 |
| 16                | S           | 328,2   | 379,1   | 447,1   | 504,8   | 564,7   | 651,6  | 707,2  |
| 17                | Cl          | 348,9   | 400,1   | 455,6   | 529,3   | 592,0   | 656,7  | 749,8  |
| 18                | Ar          | 143,46  | 422,4   | 478,7   | 539,0   | 618,3   | 686,1  | 755,7  |
| 19                | K           | 154,7   | 175,82  | 504     | 564,7   | 629,4   | 714,6  | 786,6  |
| 20                | Ca          | 147,2   | 188,3   | 211,28  | 591,9   | 657,2   | 726,6  | 817,6  |
| 21                | Sc          | 158,1   | 180,0   | 225,1   | 249,84  | 687,4   | 756,7  | 830,8  |
| 22                | Ti          | 170,4   | 192,1   | 215,92  | 265     | 291,50  | 787,8  | 863,1  |
| 23                | V           | 173,4   | 205,8   | 230,5   | 256     | 308     | 336,3  | 896,0  |
| 24                | Cr          | 184,7   | 209,3   | 244,4   | 271     | 298     | 354,8  | 384,2  |
| 25                | Mn          | 194,5   | 221,8   | 248,3   | 286,0   | 314,4   | 343,6  | 403,0  |
| 26                | Fe          | 151,06  | 234     | 262,1   | 290     | 331     | 361    | 392    |

| Атомный<br>номер Z | Элемент<br>X |        |       |     |     |     |      |     |
|--------------------|--------------|--------|-------|-----|-----|-----|------|-----|
|                    |              | VIII   | IX    | X   | XI  | XII | XIII | XIV |
| 27                 | Co           | 158    | 186,1 | 275 | 305 | 336 | 379  | 411 |
| 28                 | Ni           | 162    | 193   | 225 | 321 | 352 | 384  | 430 |
| 29                 | Cu           | 166    | 199   | 232 | 266 | 369 | 401  | 435 |
| 30                 | Zn           | 174    | 203   | 238 | 274 | 311 | 420  | 454 |
| 31                 | Ga           | 179    | 214   | 248 | 284 | 321 | 358  | 475 |
| 32                 | Ge           | 183    | 217   | 255 | 291 | 330 | 369  | 409 |
| 33                 | As           | 187    | 222   | 259 | 300 | 338 | 379  | 421 |
| 34                 | Se           | 191    | 227   | 264 | 304 | 347 | 388  | 431 |
| 35                 | Br           | 192,8  | 232   | 270 | 310 | 352 | 398  | 441 |
| 36                 | Kr           | 125,94 | 230,9 | 275 | 316 | 358 | 403  | 451 |

| Атомный<br>номер Z | Элемент<br>X |         |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|--------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    |              | XV      | XVI    | XVII   | XVIII  | XIX    | XX     | XXI    |
| 15                 | P            | 3063,87 |        |        |        |        |        |        |
| 16                 | S            | 3223,9  | 3494,2 |        |        |        |        |        |
| 17                 | Cl           | 809,4   | 3658,4 | 3946,3 |        |        |        |        |
| 18                 | Ar           | 854,8   | 918,0  | 4120,7 |        |        |        |        |
| 19                 | K            | 861,1   | 963    | 1033,4 | 4426,2 |        |        |        |
| 20                 | Ca           | 894,5   | 974    | 1037   | 4610,9 | 4934,1 |        |        |
| 21                 | Sc           | 927,5   | 1009   | 1094   | 1157   | 5128,9 | 5469,9 |        |
| 22                 | Ti           | 941,9   | 1044   | 1131   | 1221   | 1288,0 | 5674,9 | 6033,8 |
| 23                 | V            | 976     | 1060   | 1168   | 1260   | 1346   | 1426   | 6249,1 |
| 24                 | Cr           | 1011    | 1097   | 1185   | 1299   | 1355   | 1486   | 1571   |
| 25                 | Mn           | 435,6   | 1133   | 1244   | 1317   | 1396   | 1496   | 1634   |
| 26                 | Fe           | 457     | 489,3  | 1262   | 1360   | 1437   | 1539   | 1644   |
| 27                 | Co           | 444     | 512,0  | 546,6  | 1397   | 1470   | 1582   | 1690   |
| 28                 | Ni           | 464     | 499    | 571,3  | 607,0  | 1486   | 1603   | 1735   |
| 29                 | Cu           | 484     | 520    | 557    | 633    | 1541   | 1648   | 1756   |
| 30                 | Zn           | 490     | 542    | 579    | 619    | 1541   | 1690   | 1793   |
| 31                 | Ga           | 510     | 546    | 596    | 637    | 671    | 737    | 1846   |
| 32                 | Ge           | 533     | 568    | 607    | 658    | 698    | 765    | 807    |
| 33                 | As           | 462     | 594    | 630    | 670    | 701    | 744    | 836    |
| 34                 | Se           | 475     | 519    | 657    | 695    | 724    | 769    | 813    |
| 35                 | Br           | 486     | 533    | 579    | 724    | 736    | 793    | 839    |
| 36                 | Kr           | 497     | 545    | 593    | 642    | 762    | 806    | 864    |
|                    |              |         |        |        |        | 794    | 833    | 878    |

| Атомный<br>номер Z | Элемент<br>X |        |        |        |        |        |         |        |
|--------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
|                    |              | XXII   | XXIII  | XXIV   | XXV    | XXVI   | XXVII   | XXVIII |
| 22                 | Ti           | 6625,8 |        |        |        |        |         |        |
| 23                 | V            | 6851,3 | 7246,1 |        |        |        |         |        |
| 24                 | Cr           | 1721   | 7432   | 7894,8 |        |        |         |        |
| 25                 | Mn           | 1788   | 1880   | 8141   | 8571,9 |        |         |        |
| 26                 | Fe           | 1800   | 1960   | 2046   | 8828   | 9277,7 |         |        |
| 27                 | Co           | 1846   | 1962   | 2119   | 2219   | 9544   | 10012,1 |        |
| 28                 | Ni           | 1894   | 2011   | 2131   | 2295   | 2399   | 10 290  | 10 775 |
| 29                 | Cu           | 1905   | 2045   | 2173   | 2298   | 2460   | 2585    | 11 062 |
| 30                 | Zn           | 1953   | 2070   | 2216   | 2350   | 2479   | 2647    | 2780   |
| 31                 | Ga           | 2010   | 2120   | 2242   | 2393   | 2533   | 2668    | 2840   |
| 32                 | Ge           | 880    | 2180   | 2294   | 2421   | 2577   | 2723    | 2863   |
| 33                 | As           | 910    | 957    | 2357   | 2474   | 2606   | 2768    | 2920   |
| 34                 | Se           | 886    | 987    | 1036,3 | 2542   | 2661   | 2798    | 2965   |
| 35                 | Br           | 913    | 961    | 1068   | 1119   | 2733   | 2855    | 2997   |
| 36                 | Kr           | 939    | 989    | 1039   | 1151   | 1205   | 2931    | 3056   |

| Атомный номер Z | Элемент X |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 |           | XXIX   | XXX    | XXXI   | XXXII  | XXXIII | XXXIV  | XXXV   | XXXVI  |
| 29              | Cu        | 11 568 |        |        |        |        |        |        |        |
| 30              | Zn        | 11 865 | 12 389 |        |        |        |        |        |        |
| 31              | Ga        | 2982   | 12 696 | 13 239 |        |        |        |        |        |
| 32              | Ge        | 3041   | 3192   | 13 550 | 14 119 |        |        |        |        |
| 33              | As        | 3065   | 3248   | 3409   | 14 440 | 15 029 |        |        |        |
| 34              | Se        | 3123   | 3274   | 3463   | 3633   | 15 370 | 15 968 |        |        |
| 35              | Br        | 3170   | 3334   | 3490   | 3684   | 3865   | 16 315 | 16 937 |        |
| 36              | Kr        | 3203   | 3381   | 3551   | 3712   | 3912   | 4105   | 17 290 | 17 936 |

Таблица 19.3. Потенциал ионизации одно-, двух- и трехзарядных тяжелых атомных ионов ( $37 \leq Z \leq 92$ ), эВ  
(X<sub>z</sub> — спектроскопический символ иона)

| Атомный номер Z | Элемент X | ζ       |        |        |
|-----------------|-----------|---------|--------|--------|
|                 |           | II      | III    | IV     |
| 37              | Rb        | 27,290  | 39,2   | 52,2   |
| 38              | Sr        | 11,030  | 42,88  | 56,28  |
| 39              | Y         | 12,24   | 20,525 | 60,61  |
| 40              | Zr        | 13,13   | 23,1   | 34,419 |
| 41              | Nb        | 14,32   | 25,0   | 37,7   |
| 42              | Mo        | 16,16   | 27,2   | 46,4   |
| 43              | Tc        | 15,26   | 29,5   | —      |
| 44              | Ru        | 16,76   | 28,5   | —      |
| 45              | Rh        | 18,08   | 31,1   | —      |
| 46              | Pd        | 19,43   | 32,9   | —      |
| 47              | Ag        | 21,49   | 34,8   | —      |
| 48              | Cd        | 16,908  | 37,47  | —      |
| 49              | In        | 18,87   | 28,0   | 57,0   |
| 50              | Sn        | 14,632  | 30,50  | 40,74  |
| 51              | Sb        | 16,53   | 25,32  | 44,16  |
| 52              | Te        | 18,6    | 27,96  | 37,42  |
| 53              | I         | 19,131  | 33,0   | —      |
| 54              | Xe        | 20,98   | 31,0   | 45     |
| 55              | Cs        | 23,1575 | 33,4   | 46     |
| 56              | Ba        | 10,004  | 35,8   | 47     |
| 57              | La        | 11,1    | 19,18  | 49,9   |
| 58              | Ce        | 10,8    | 20,20  | 36,76  |

Продолжение табл. 19.3

| Атомный номер Z | Элемент X | ζ      |       |       |
|-----------------|-----------|--------|-------|-------|
|                 |           | II     | III   | IV    |
| 59              | Pr        | 10,6   | 21,62 | 38,98 |
| 60              | Nd        | 10,7   | 22,1  | 40,4  |
| 61              | Pm        | 10,9   | 22,3  | 41,0  |
| 62              | Sm        | 11,1   | 23,4  | 41,4  |
| 63              | Eu        | 11,24  | 24,9  | 42,7  |
| 64              | Gd        | 12,1   | 20,6  | 44,0  |
| 65              | Tb        | 11,5   | 21,9  | 39,4  |
| 66              | Dy        | 11,7   | 22,8  | 41,4  |
| 67              | Ho        | 11,8   | 22,8  | 42,5  |
| 68              | Er        | 11,9   | 22,7  | 42,7  |
| 69              | Tm        | 12,1   | 23,7  | 42,7  |
| 70              | Yb        | 12,18  | 25,05 | 43,6  |
| 71              | Lu        | 13,9   | 20,96 | 45,25 |
| 72              | Hf        | 14,9   | 23,3  | 33,4  |
| 78              | Pt        | 18,56  | —     | —     |
| 79              | Au        | 20,5   | 34    | 43    |
| 80              | Hg        | 18,76  | 34,2  | 46    |
| 81              | Tl        | 20,43  | 29,85 | —     |
| 82              | Pb        | 15,033 | 31,94 | 42,33 |
| 83              | Bi        | 16,70  | 25,56 | 45,3  |
| 88              | Ra        | 10,15  | —     | —     |
| 89              | Ac        | 11,75  | 20    | —     |
| 90              | Th        | 11,9   | 18,3  | 28,7  |
| 92              | U         | 11,9   | 20    | 37    |

Таблица 19.4. Потенциал ионизации молекул IP

| Молекула                | IP, эВ  | Молекула        | IP, эВ   |
|-------------------------|---------|-----------------|----------|
| 1. Двухатомные молекулы |         |                 |          |
| AgF                     | 11,4(B) | BC              | 10,5(C)  |
| AlCl                    | 9,4(C)  | BF              | 11,1(A)  |
| AlF                     | 9,8(C)  | BH              | 9,8(B)   |
| AlO                     | 9,5(C)  | BO              | 13,5(C)  |
| AlS                     | 9,5(C)  | BSi             | 7,8(C)   |
| AlTe                    | 9,0(C)  | BaCl            | 5,0(B)   |
| Ar <sub>2</sub>         | 14,5(A) | BaF             | 4,9(C)   |
| ArKr                    | 13,4(A) | BaO             | 6,9(C)   |
| ArXe                    | 12,0(A) | BeF             | 9,1(C)   |
| As <sub>2</sub>         | 12(C)   | BeH             | 8,2(B)   |
| At <sub>2</sub>         | 8,3(C)  | BeO             | 10,1(C)  |
| AuBr                    | 9,2(C)  | Br <sub>2</sub> | 10,52(A) |
| AuSi                    | 8,3(C)  | BrCl            | 11,1(B)  |

Продолжение табл. 19.4

| Молекула       | IP, эВ    | Молекула        | IP, эВ    |
|----------------|-----------|-----------------|-----------|
| BrF            | 11,8(B)   | Cl <sub>2</sub> | 11,50(A)  |
| BrO            | 10,3(A)   | ClF             | 12,7(B)   |
| C <sub>2</sub> | 12,15(A)  | ClO             | 11,0(B)   |
| CF             | 9,20(B)   | CoO             | 9,0(C)    |
| CH             | 10,64(A)  | CrF             | 8,4(C)    |
| CN             | 14,2(A)   | CrO             | 8,4(C)    |
| CO             | 14,014(A) | Cs <sub>2</sub> | 3,64(B)   |
| CS             | 11,33(A)  | CsBr            | 7,72(A)   |
| CaF            | 6,0(C)    | CsCl            | 8,3(B)    |
| CaH            | 5,9(B)    | CsF             | 8,8(B)    |
| CaCl           | 6,0(B)    | CsI             | 7,25(A)   |
| CaO            | 6,5(C)    | Cu <sub>2</sub> | 7,4(B)    |
| CeO            | 4,9(C)    | D <sub>2</sub>  | 15,467(A) |

| Молекула        | IP, эВ      | Молекула        | IP, эВ     | Молекула        | IP, эВ     | Молекула          | IP, эВ    |
|-----------------|-------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-------------------|-----------|
| DBr             | 11,67 (A)   | MnF             | 8,7 (C)    | SrO             | 6,1 (C)    | SrCl <sub>2</sub> | 9,7 (B)   |
| DCI             | 12,76 (A)   | MoO             | 8,0 (C)    | T <sub>2</sub>  | 15,487 (A) | UO <sub>2</sub>   | 5,5 (B)   |
| DF              | 16,06 (A)   | N <sub>2</sub>  | 15,581 (A) | TaO             | 6,0 (C)    | XeF <sub>2</sub>  | 12,42 (A) |
| DI              | 10,39 (A)   | NF              | 12,3 (B)   | Te <sub>2</sub> | 8,29 (A)   |                   |           |
| DT              | 15,475 (A)  | NH              | 13,1 (A)   | TeO             | 8,7 (B)    |                   |           |
| DyF             | 6,0 (C)     | NO              | 9,264 (A)  | Ti <sub>2</sub> | 6,3 (C)    |                   |           |
| ErF             | 6,3 (C)     | NS              | 8,9 (B)    | TiO             | 6,4 (C)    |                   |           |
| F <sub>2</sub>  | 15,686 (A)  | Na <sub>2</sub> | 4,90 (A)   | TiS             | 7,1 (C)    |                   |           |
| FeO             | 8,7 (B)     | NaBr            | 8,3 (B)    | TIBr            | 9,14 (A)   |                   |           |
| GaF             | 10,6 (C)    | NaCl            | 8,93 (A)   | TICl            | 9,70 (A)   |                   |           |
| GaO             | 9,4 (C)     | NaI             | 7,64 (A)   | TIF             | 10,5 (B)   |                   |           |
| GaS             | 8,9 (C)     | NaLi            | 4,9 (B)    | TII             | 8,47 (A)   |                   |           |
| GaSe            | 8,8 (C)     | NaK             | 4,6 (C)    | V <sub>2</sub>  | 6,4 (C)    |                   |           |
| GaTe            | 8,4 (C)     | NdO             | 5,0 (D)    | VO              | 5,0 (D)    |                   |           |
| Ge <sub>2</sub> | 7,9 (C)     | NiCl            | 11,4 (B)   | WO              | 9,1 (D)    |                   |           |
| GeBr            | 7,3 (C)     | NiO             | 9,5 (C)    | UC              | 6,2 (C)    |                   |           |
| GeC             | 10,3 (C)    | O <sub>2</sub>  | 12,071 (A) | UN              | 7,0 (C)    |                   |           |
| GeCl            | 7,2 (C)     | OD              | 12,9 (A)   | UO              | 5,7 (B)    |                   |           |
| GeF             | 7,5 (C)     | OH              | 12,9 (A)   | US              | 6,3 (C)    |                   |           |
| GeO             | 11,1 (B)    | OT              | 12,9 (A)   | Xe <sub>2</sub> | 11,13 (A)  |                   |           |
| GeSi            | 8,2 (C)     | P <sub>2</sub>  | 10,5 (A)   | ZrN             | 7,9 (C)    |                   |           |
| GeTe            | 10,1 (C)    | PC              | 10,5 (C)   | ZrO             | 6,1 (C)    |                   |           |
| H <sub>2</sub>  | 15,4259 (A) | PH              | 10,6 (B)   |                 |            |                   |           |
| HBr             | 11,67 (A)   | PO              | 8,2 (B)    |                 |            |                   |           |
| HCl             | 12,75 (A)   | PbBr            | 7,8 (C)    |                 |            |                   |           |
| HD              | 15,445 (A)  | PbCl            | 7,5 (C)    |                 |            |                   |           |
| HF              | 16,04 (A)   | PbF             | 7,5 (C)    |                 |            |                   |           |
| HI              | 10,38 (A)   | PbO             | 9,0 (C)    |                 |            |                   |           |
| HT              | 15,451 (A)  | PbS             | 8,6 (C)    |                 |            |                   |           |
| He <sub>2</sub> | 22,22 (A)   | PbTe            | 8,2 (C)    |                 |            |                   |           |
| HfO             | 7,5 (B)     | Pd <sub>2</sub> | 7,7 (C)    |                 |            |                   |           |
| HoF             | 6,2 (C)     | PdO             | 9,1 (C)    |                 |            |                   |           |
| I <sub>2</sub>  | 9,3 (B)     | PdSi            | 8,4 (C)    |                 |            |                   |           |
| IBr             | 9,85 (A)    | PrO             | 4,9 (C)    |                 |            |                   |           |
| ICl             | 10,08 (A)   | PtB             | 10 (D)     |                 |            |                   |           |
| IF              | 10,5 (B)    | PtSi            | 7,9 (C)    |                 |            |                   |           |
| InBr            | 9,1 (B)     | Rb <sub>2</sub> | 3,45 (B)   |                 |            |                   |           |
| InCl            | 9,5 (B)     | RbBr            | 7,7 (B)    |                 |            |                   |           |
| InF             | 9,6 (C)     | RbCl            | 8,3 (B)    |                 |            |                   |           |
| InI             | 8,5 (B)     | RbI             | 7,1 (B)    |                 |            |                   |           |
| InS             | 7,0 (C)     | RhO             | 9,3 (C)    |                 |            |                   |           |
| InSe            | 7,1 (C)     | RuO             | 8,7 (C)    |                 |            |                   |           |
| InTe            | 7,6 (C)     | S <sub>2</sub>  | 9,356 (A)  |                 |            |                   |           |
| IrC             | 9,5 (D)     | SH              | 10,4 (A)   |                 |            |                   |           |
| K <sub>2</sub>  | 4,0 (B)     | SO              | 10,29 (A)  |                 |            |                   |           |
| KCl             | 8,4 (B)     | Sb <sub>2</sub> | 9,0 (C)    |                 |            |                   |           |
| KI              | 8,2 (C)     | Se <sub>2</sub> | 8,88 (A)   |                 |            |                   |           |
| KLi             | 4,7 (B)     | SeH             | 9,06 (A)   |                 |            |                   |           |
| KNa             | 4,5 (B)     | Si <sub>2</sub> | 7,4 (C)    |                 |            |                   |           |
| Kr <sub>2</sub> | 12,87 (A)   | SiC             | 10,2 (B)   |                 |            |                   |           |
| LaO             | 4,9 (B)     | SiF             | 7,26 (A)   |                 |            |                   |           |
| Li <sub>2</sub> | 5,145 (A)   | SiO             | 11,4 (A)   |                 |            |                   |           |
| LiBr            | 10,0 (C)    | SnBr            | 7,4 (C)    |                 |            |                   |           |
| LiCl            | 10,1 (C)    | SnCl            | 6,6 (C)    |                 |            |                   |           |
| LiD             | 7,7 (C)     | SnF             | 7,4 (C)    |                 |            |                   |           |
| LiF             | 11,3 (C)    | SnO             | 10,5 (C)   |                 |            |                   |           |
| LiH             | 7,85 (B)    | SnS             | 9,7 (C)    |                 |            |                   |           |
| LiI             | 8,6 (C)     | SnSe            | 9,7 (C)    |                 |            |                   |           |
| LiNa            | 4,9 (B)     | SnTe            | 9,1 (C)    |                 |            |                   |           |
| LiO             | 8,4 (B)     | SrCl            | 5,6 (B)    |                 |            |                   |           |
| MgCl            | 7,5 (B)     | SrF             | 4,9 (C)    |                 |            |                   |           |
| MgF             | 7,8 (C)     |                 |            |                 |            |                   |           |
| Mn <sub>2</sub> | 7,4 (C)     |                 |            |                 |            |                   |           |

## 2. Трехатомные молекулы

|                   |            |
|-------------------|------------|
| BH <sub>2</sub>   | 9,8 (C)    |
| BaCl <sub>2</sub> | 9,2 (B)    |
| BaI <sub>2</sub>  | 8,1 (C)    |
| BeF <sub>2</sub>  | 14,7 (C)   |
| BrCN              | 11,84 (A)  |
| CCl <sub>2</sub>  | 13,2 (B)   |
| CF <sub>2</sub>   | 11,8 (B)   |
| CH <sub>2</sub>   | 10,396 (A) |
| CO <sub>2</sub>   | 13,79 (A)  |
| COS               | 11,18 (A)  |
| CS <sub>2</sub>   | 10,07 (A)  |
| CaCl <sub>2</sub> | 10,3 (A)   |
| ClCN              | 12,34 (A)  |
| ClO <sub>2</sub>  | 11,1 (C)   |
| Cs <sub>2</sub> O | 4,45 (A)   |
| CsOH              | 7,21 (B)   |
| FCN               | 13,32 (A)  |
| GeBr <sub>2</sub> | 9,5 (C)    |
| GeCl <sub>2</sub> | 10,4 (C)   |
| GeF <sub>2</sub>  | 11,8 (B)   |
| HCN               | 13,73 (A)  |
| HO <sub>2</sub>   | 11,53 (A)  |
| H <sub>2</sub> O  | 12,614 (A) |
| H <sub>2</sub> S  | 10,47 (A)  |
| ICN               | 10,87 (A)  |
| Li <sub>2</sub> O | 6,8 (B)    |
| NF <sub>2</sub>   | 12,11 (A)  |
| NH <sub>2</sub>   | 10,15 (A)  |
| NO <sub>2</sub>   | 9,78 (A)   |
| N <sub>2</sub> O  | 12,89 (A)  |
| O <sub>3</sub>    | 12,52 (A)  |
| SO <sub>2</sub>   | 12,34 (A)  |
| SiC <sub>2</sub>  | 10,2 (B)   |
| SiF <sub>2</sub>  | 11,0 (C)   |
| SiO <sub>2</sub>  | 11,7 (C)   |
| SnCl <sub>2</sub> | 10,2 (C)   |

## 4. Пятиатомные молекулы

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| CBr <sub>4</sub>                | 11,0 (B)  |
| CCl <sub>4</sub>                | 11,47 (A) |
| CF <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub> | 12,31 (A) |
| CFCI <sub>3</sub>               | 11,77 (A) |
| CH <sub>4</sub>                 | 12,98 (A) |
| CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 11,35 (A) |
| CH <sub>3</sub> Br              | 10,53 (A) |
| CH <sub>3</sub> I               | 9,538 (A) |
| SiH <sub>4</sub>                | 11,4 (C)  |
| SnBr <sub>4</sub>               | 11,0 (A)  |
| SnCl <sub>4</sub>               | 12,10 (A) |
| XeF <sub>4</sub>                | 12,65 (A) |

## 5. Шестиатомные молекулы

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> | 9,34 (A)  |
| C <sub>2</sub> F <sub>4</sub>  | 10,12 (A) |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 10,51 (A) |
| CH <sub>3</sub> OH             | 10,85 (A) |
| N <sub>2</sub> F <sub>4</sub>  | 12,0 (A)  |
| N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 8,74 (A)  |

## 6. Более сложные молекулы

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| SF <sub>6</sub>                  | 15,7 (A)  |
| UF <sub>6</sub>                  | 14,14 (A) |
| XeF <sub>6</sub>                 | 12,19 (A) |
| B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 11,41 (A) |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 11,50 (A) |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br | 10,29 (A) |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | 10,47 (A) |



Таблица 19.5 Энергия связи электронов из внутренних оболочек свободных атомов, эВ  
I.  $Z = 3 \div 18$

| Атомный номер Z | Атом | Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона |                   |                   |                   |                   | Атомный номер Z | Атом | Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона |                   |                   |                   |                   |
|-----------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 |      | K                                                                                       | L <sub>1</sub>    | L <sub>2</sub>    | L <sub>3</sub>    | M <sub>1</sub>    |                 |      | K                                                                                       | L <sub>1</sub>    | L <sub>2</sub>    | L <sub>3</sub>    | M <sub>1</sub>    |
|                 |      | 1s <sub>1/2</sub>                                                                       | 2s <sub>1/2</sub> | 2p <sub>1/2</sub> | 2p <sub>3/2</sub> | 3s <sub>1/2</sub> |                 |      | 1s <sub>1/2</sub>                                                                       | 2s <sub>1/2</sub> | 2p <sub>1/2</sub> | 2p <sub>3/2</sub> | 3s <sub>1/2</sub> |
| 3               | Li   | 64,40                                                                                   |                   |                   |                   |                   | 11              | Na   | 1079                                                                                    | 70,9              | 38,46             | 38,0              |                   |
| 4               | Be   | 123,6                                                                                   |                   |                   |                   |                   | 12              | Mg   | 1311,3                                                                                  | 96,5              | 57,6              | 57,6              |                   |
| 5               | B    | 201                                                                                     | 12,93             |                   |                   |                   | 13              | Al   | 1567                                                                                    | 126               | 81                | 80                | 10,62             |
| 6               | C    | 296                                                                                     | 16,59             |                   |                   |                   | 14              | Si   | 1844                                                                                    | 154               | 104               | 104               | 13,46             |
| 7               | N    | 403                                                                                     | 20,33             |                   |                   |                   | 15              | P    | 2148                                                                                    | 191               | 135               | 134               | 16,15             |
| 8               | O    | 538                                                                                     | 28,48             |                   |                   |                   | 16              | S    | 2476                                                                                    | 232               | 170               | 168               | 20,20             |
| 9               | F    | 694                                                                                     | 37,86             |                   |                   |                   | 17              | Cl   | 2829                                                                                    | 277               | 208               | 206               | 24,59             |
| 10              | Ne   | 870,27                                                                                  | 48,47             |                   |                   |                   | 18              | Ar   | 3206                                                                                    | 326,37            | 250,6             | 248,6             | 29,24             |

II.  $Z = 19 \div 36$

| Атомный номер Z | Атом | Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-----------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 |      | K                                                                                       | L <sub>1</sub>    | L <sub>2</sub>    | L <sub>3</sub>    | M <sub>1</sub>    | M <sub>2</sub>    | M <sub>3</sub>    | M <sub>4</sub>    | M <sub>5</sub>    | N <sub>1</sub>    |
|                 |      | 1s <sub>1/2</sub>                                                                       | 2s <sub>1/2</sub> | 2p <sub>1/2</sub> | 2p <sub>3/2</sub> | 3s <sub>1/2</sub> | 3p <sub>1/2</sub> | 3p <sub>3/2</sub> | 3d <sub>3/2</sub> | 3d <sub>5/2</sub> | 4s <sub>1/2</sub> |
| 19              | K    | 3614                                                                                    | 384               | 303,3             | 300,7             | 37                | 24,82             | 24,49             |                   |                   |                   |
| 20              | Ca   | 4048                                                                                    | 447               | 360               | 356               | 48                | 34,7              | 34,3              |                   |                   |                   |
| 21              | Sc   | 4494                                                                                    | 503               | 408               | 404               | 56                | 33                | 33                |                   |                   |                   |
| 22              | Ti   | 4970                                                                                    | 567               | 465               | 459               | 64                | 39                | 38                |                   |                   |                   |
| 23              | V    | 5470                                                                                    | 633               | 525               | 518               | 72                | 44                | 43                |                   |                   |                   |
| 24              | Cr   | 5995                                                                                    | 702               | 589               | 580               | 80                | 49                | 48                |                   |                   |                   |
| 25              | Mn   | 6544                                                                                    | 755               | 656               | 652               | 89                | 55                | 53                |                   |                   |                   |
| 26              | Fe   | 7117                                                                                    | 851               | 726               | 713               | 98                | 61                | 59                |                   |                   |                   |
| 27              | Co   | 7715                                                                                    | 931               | 800               | 785               | 107               | 68                | 66                |                   |                   |                   |
| 28              | Ni   | 8338                                                                                    | 1015              | 877               | 860               | 117               | 75                | 73                |                   |                   |                   |
| 29              | Cu   | 8986                                                                                    | 1103              | 958               | 938               | 127               | 82                | 80                |                   |                   |                   |
| 30              | Zn   | 9663                                                                                    | 1198              | 1052              | 1029              | 141               | 98,7              | 96,1              |                   |                   |                   |
| 31              | Ga   | 10371                                                                                   | 1302              | 1146              | 1119              | 162               | 111               | 107               | 21                | 20                | 11,87             |
| 32              | Ge   | 11107                                                                                   | 1413              | 1251              | 1220              | 184               | 130               | 125               | 33                | 32                | 14,28             |
| 33              | As   | 11871                                                                                   | 1531              | 1362              | 1327              | 208               | 151               | 145               | 46                | 45                | 18,96             |
| 34              | Se   | 12662                                                                                   | 1656              | 1479              | 1439              | 234               | 173               | 166               | 61                | 60                | 22,19             |
| 35              | Br   | 13481                                                                                   | 1787              | 1602              | 1556              | 262               | 197               | 189               | 77                | 76                | 23,80             |
| 36              | Kr   | 14327                                                                                   | 1923              | 1731              | 1678              | 293               | 222               | 214,6             | 95,0              | 93,8              | 27,51             |

III.  $Z = 37 \div 54$

| Атомный номер Z | Атом | Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-----------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 |      | K                                                                                       | L <sub>1</sub>    | L <sub>2</sub>    | L <sub>3</sub>    | M <sub>1</sub>    | M <sub>2</sub>    | M <sub>3</sub>    | M <sub>4</sub>    | M <sub>5</sub>    | N <sub>1</sub>    | N <sub>2</sub>    | N <sub>3</sub>    | N <sub>4</sub>    | N <sub>5</sub>    | O <sub>1</sub>    |
|                 |      | 1s <sub>1/2</sub>                                                                       | 2s <sub>1/2</sub> | 2p <sub>1/2</sub> | 2p <sub>3/2</sub> | 3s <sub>1/2</sub> | 3p <sub>1/2</sub> | 3p <sub>3/2</sub> | 3d <sub>3/2</sub> | 3d <sub>5/2</sub> | 4s <sub>1/2</sub> | 4p <sub>1/2</sub> | 4p <sub>3/2</sub> | 4d <sub>3/2</sub> | 4d <sub>5/2</sub> | 5s <sub>1/2</sub> |
| 37              | Rb   | 15203                                                                                   | 2068              | 1867              | 1807              | 325               | 254,3             | 245,4             | 117,4             | 116               | 114               | 21,77             | 20,71             |                   |                   |                   |
| 38              | Sr   | 16108                                                                                   | 2219              | 2010              | 1943              | 361               | 288               | 278               | 144               | 142               | 40                | 29,2              | 28,2              |                   |                   |                   |
| 39              | Y    | 17041                                                                                   | 2375              | 2158              | 2083              | 397               | 315               | 304               | 163               | 161               | 48                | 30                | 29                |                   |                   |                   |
| 40              | Zr   | 18002                                                                                   | 2536              | 2311              | 2227              | 434               | 348               | 335               | 187               | 185               | 56                | 35                | 33                |                   |                   |                   |
| 41              | Nb   | 18990                                                                                   | 2702              | 2469              | 2375              | 472               | 382               | 367               | 212               | 209               | 62                | 40                | 38                |                   |                   |                   |
| 42              | Mo   | 20006                                                                                   | 2872              | 2632              | 2527              | 511               | 416               | 399               | 237               | 234               | 68                | 45                | 42                |                   |                   |                   |
| 43              | Tc   | 21050                                                                                   | 3048              | 2800              | 2683              | 551               | 451               | 432               | 263               | 259               | 74                | 49                | 45                |                   |                   |                   |
| 44              | Ru   | 22123                                                                                   | 3230              | 2973              | 2844              | 592               | 488               | 466               | 290               | 286               | 81                | 53                | 49                |                   |                   |                   |

| Атомный номер Z | Атом | Электронные подболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-----------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 |      | K                                                                                      | L <sub>1</sub>    | L <sub>2</sub>    | L <sub>3</sub>    | M <sub>1</sub>    | M <sub>2</sub>    | M <sub>3</sub>    | M <sub>4</sub>    | M <sub>5</sub>    | N <sub>1</sub>    | N <sub>2</sub>    | N <sub>3</sub>    | N <sub>4</sub>    | N <sub>5</sub>    | O <sub>1</sub>    |
|                 |      | 1s <sub>1/2</sub>                                                                      | 2s <sub>1/2</sub> | 2p <sub>1/2</sub> | 2p <sub>3/2</sub> | 3s <sub>1/2</sub> | 3p <sub>1/2</sub> | 3p <sub>3/2</sub> | 3d <sub>3/2</sub> | 3d <sub>5/2</sub> | 4s <sub>1/2</sub> | 4p <sub>1/2</sub> | 4p <sub>3/2</sub> | 4d <sub>3/2</sub> | 4d <sub>5/2</sub> | 5s <sub>1/2</sub> |
| 45              | Rh   | 23225                                                                                  | 3418              | 3152              | 3010              | 634               | 526               | 501               | 318               | 313               | 87                | 58                | 53                |                   |                   |                   |
| 46              | Pd   | 24357                                                                                  | 3611              | 3337              | 3180              | 677               | 565               | 537               | 347               | 342               | 93                | 63                | 57                |                   |                   |                   |
| 47              | Ag   | 25520                                                                                  | 3812              | 3530              | 3357              | 724               | 608               | 577               | 379               | 376               | 101               | 69                | 63                |                   |                   |                   |
| 48              | Cd   | 26715                                                                                  | 4022              | 3732              | 3542              | 775               | 659               | 625               | 419               | 412               | 112               | 78                | 71                | 18,28             | 17,58             |                   |
| 49              | In   | 27944                                                                                  | 4242              | 3943              | 3735              | 830               | 707               | 669               | 455               | 447               | 126               | 90                | 82                | 21                | 20                | 11,03             |
| 50              | Sn   | 29204                                                                                  | 4469              | 4160              | 3933              | 888               | 761               | 719               | 497               | 489               | 141               | 102               | 93                | 29                | 28                | 13,10             |
| 51              | Sb   | 30496                                                                                  | 4703              | 4385              | 4137              | 949               | 817               | 771               | 542               | 533               | 157               | 114               | 104               | 38                | 37                | 16,86             |
| 52              | Te   | 31820                                                                                  | 4945              | 4618              | 4347              | 1012              | 876               | 825               | 589               | 578               | 174               | 127               | 117               | 48                | 46                | 17,84             |
| 53              | I    | 33176                                                                                  | 5195              | 4858              | 4563              | 1078              | 937               | 881               | 638               | 626               | 193               | 141               | 131               | 58                | 56                | 20,61             |
| 54              | Xe   | 34561                                                                                  | 5453              | 5107              | 4787              | 1149              | 1002              | 941               | 689               | 677               | 213,3             | 157               | 145,5             | 69,5              | 67,5              | 23,40             |

## IV. Z = 55 ÷ 83

| Атомный номер Z | Атом | Электронные подболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-----------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 |      | K                                                                                      | L <sub>1</sub>    | L <sub>2</sub>    | L <sub>3</sub>    | M <sub>1</sub>    | M <sub>2</sub>    | M <sub>3</sub>    | M <sub>4</sub>    | M <sub>5</sub>    | N <sub>1</sub>    | N <sub>2</sub>    | N <sub>3</sub>    | N <sub>4</sub>    | N <sub>5</sub>    | O <sub>1</sub>    | O <sub>2</sub>    | O <sub>3</sub>    |
|                 |      | 1s <sub>1/2</sub>                                                                      | 2s <sub>1/2</sub> | 2p <sub>1/2</sub> | 2p <sub>3/2</sub> | 3s <sub>1/2</sub> | 3p <sub>1/2</sub> | 3p <sub>3/2</sub> | 3d <sub>3/2</sub> | 3d <sub>5/2</sub> | 4s <sub>1/2</sub> | 4p <sub>1/2</sub> | 4p <sub>3/2</sub> | 4d <sub>3/2</sub> | 4d <sub>5/2</sub> | 5s <sub>1/2</sub> | 5p <sub>1/2</sub> | 5p <sub>3/2</sub> |
| 55              | Cs   | 35987                                                                                  | 5717              | 5362              | 5014              | 1220              | 1068              | 1005              | 746               | 732               | 233               | 174               | 164               | 81                | 79                | 25                | 19,07             | 17,21             |
| 56              | Ba   | 37442                                                                                  | 5991              | 5626              | 5249              | 1293              | 1138              | 1063              | 797               | 788               | 254               | 193               | 181               | 101               | 98,4              | 31                | 24,8              | 22,8              |
| 57              | La   | 38928                                                                                  | 6269              | 5894              | 5486              | 1365              | 1207              | 1124              | 851               | 834               | 273               | 210               | 196               | 105               | 103               | 36                | 22                | 19                |
| 58              | Ce   | 40446                                                                                  | 6552              | 6167              | 5726              | 1437              | 1275              | 1184              | 903               | 885               | 291               | 225               | 209               | 114               | 111               | 39                | 25                | 22                |
| 59              | Pr   | 41995                                                                                  | 6839              | 6444              | 5968              | 1509              | 1342              | 1244              | 954               | 934               | 307               | 238               | 220               | 121               | 117               | 41                | 27                | 24                |
| 60              | Nd   | 43575                                                                                  | 7132              | 6727              | 6213              | 1580              | 1408              | 1303              | 1005              | 983               | 321               | 250               | 230               | 126               | 122               | 42                | 28                | 25                |
| 61              | Pm   | 45188                                                                                  | 7432              | 7017              | 6464              | 1653              | 1476              | 1362              | 1057              | 1032              | 335               | 261               | 240               | 131               | 127               | 43                | 28                | 25                |
| 62              | Sm   | 46837                                                                                  | 7740              | 7315              | 6720              | 1728              | 1546              | 1422              | 1110              | 1083              | 349               | 273               | 251               | 137               | 132               | 44                | 29                | 25                |
| 63              | Eu   | 48522                                                                                  | 8056              | 7621              | 6981              | 1805              | 1618              | 1484              | 1164              | 1135              | 364               | 286               | 262               | 143               | 137               | 45                | 30                | 26                |
| 64              | Gd   | 50243                                                                                  | 8380              | 7935              | 7247              | 1884              | 1692              | 1547              | 1220              | 1189              | 380               | 300               | 273               | 150               | 143               | 46                | 31                | 27                |
| 65              | Tb   | 51999                                                                                  | 8711              | 8256              | 7518              | 1965              | 1768              | 1612              | 1277              | 1243              | 398               | 315               | 285               | 157               | 150               | 48                | 32                | 28                |
| 66              | Dy   | 53792                                                                                  | 9050              | 8585              | 7794              | 2048              | 1846              | 1678              | 1335              | 1298              | 416               | 331               | 297               | 164               | 157               | 50                | 33                | 28                |
| 67              | Ho   | 55622                                                                                  | 9398              | 8922              | 8075              | 2133              | 1926              | 1746              | 1395              | 1354              | 434               | 348               | 310               | 172               | 164               | 52                | 34                | 29                |
| 68              | Er   | 57489                                                                                  | 9754              | 9267              | 8361              | 2220              | 2008              | 1815              | 1456              | 1412              | 452               | 365               | 323               | 181               | 172               | 54                | 35                | 30                |
| 69              | Tm   | 59393                                                                                  | 10118             | 9620              | 8651              | 2309              | 2092              | 1885              | 1518              | 1471              | 471               | 382               | 336               | 190               | 181               | 56                | 36                | 30                |
| 70              | Yb   | 61335                                                                                  | 10490             | 9981              | 8946              | 2401              | 2178              | 1956              | 1580              | 1531              | 490               | 399               | 349               | 200               | 190               | 58                | 37                | 31                |
| 71              | Lu   | 63320                                                                                  | 10876             | 10355             | 9250              | 2499              | 2270              | 2032              | 1647              | 1596              | 514               | 420               | 366               | 213               | 202               | 62                | 39                | 32                |
| 72              | Hf   | 65350                                                                                  | 11275             | 10742             | 9564              | 2604              | 2369              | 2113              | 1720              | 1665              | 542               | 444               | 386               | 229               | 217               | 68                | 43                | 35                |
| 73              | Ta   | 67419                                                                                  | 11684             | 11139             | 9884              | 2712              | 2472              | 2197              | 1796              | 1737              | 570               | 469               | 407               | 245               | 232               | 74                | 47                | 38                |
| 74              | W    | 69529                                                                                  | 12103             | 11546             | 10209             | 2823              | 2577              | 2283              | 1874              | 1811              | 599               | 495               | 428               | 261               | 248               | 80                | 51                | 41                |
| 75              | Re   | 71681                                                                                  | 12532             | 11963             | 10540             | 2937              | 2686              | 2371              | 1953              | 1887              | 629               | 522               | 450               | 278               | 264               | 86                | 56                | 45                |
| 76              | Os   | 73876                                                                                  | 12972             | 12390             | 10876             | 3054              | 2797              | 2461              | 2035              | 1964              | 660               | 551               | 473               | 295               | 280               | 92                | 61                | 49                |
| 77              | Ir   | 76115                                                                                  | 13422             | 12828             | 11219             | 3175              | 2912              | 2554              | 2119              | 2044              | 693               | 581               | 497               | 314               | 298               | 99                | 66                | 53                |
| 78              | Pt   | 78399                                                                                  | 13883             | 13277             | 11567             | 3300              | 3030              | 2649              | 2206              | 2126              | 727               | 612               | 522               | 335               | 318               | 106               | 71                | 57                |
| 79              | Au   | 80729                                                                                  | 14356             | 13738             | 11923             | 3430              | 3153              | 2748              | 2295              | 2210              | 764               | 645               | 548               | 357               | 339               | 114               | 76                | 61                |
| 80              | Hg   | 83108                                                                                  | 14845             | 14214             | 12288             | 3567              | 3283              | 2852              | 2390              | 2300              | 809               | 686               | 584               | 385               | 366               | 134               | 90                | 72                |
| 81              | Tl   | 85536                                                                                  | 15350             | 14704             | 12662             | 3710              | 3420              | 2961              | 2490              | 2394              | 852               | 726               | 615               | 411               | 391               | 139               | 98                | 79                |
| 82              | Pb   | 88011                                                                                  | 15867             | 15206             | 13041             | 3857              | 3560              | 3072              | 2592              | 2490              | 899               | 769               | 651               | 441               | 419               | 153               | 111               | 90                |
| 83              | Bi   | 90534                                                                                  | 16396             | 15719             | 13426             | 4007              | 3704              | 3185              | 2696              | 2588              | 946               | 813               | 687               | 472               | 448               | 167               | 125               | 101               |

$$V. Z = 84 \div 94$$

| Атомный номер Z | Атом | Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                 |      | $K$                                                                                     | $L_1$      | $L_2$      | $L_3$      | $M_1$      | $M_2$      | $M_3$      | $M_4$      | $M_5$      | $N_1$      | $N_2$      | $N_3$      | $N_4$      | $N_5$      | $N_6$      | $N_7$      | $O_1$      | $O_2$      | $O_3$      | $O_4$      | $O_5$      |
|                 |      | $1s_{1/2}$                                                                              | $2s_{1/2}$ | $2p_{1/2}$ | $2p_{3/2}$ | $3s_{1/2}$ | $3p_{1/2}$ | $3p_{3/2}$ | $3d_{3/2}$ | $3d_{5/2}$ | $4s_{1/2}$ | $4p_{1/2}$ | $4p_{3/2}$ | $4d_{3/2}$ | $4d_{5/2}$ | $4f_{5/2}$ | $4f_{7/2}$ | $5s_{1/2}$ | $5p_{1/2}$ | $5p_{3/2}$ | $5d_{3/2}$ | $5d_{5/2}$ |
| 84              | Po   | 93105                                                                                   | 16933      | 16242      | 13815      | 4160       | 3850       | 3300       | 2800       | 2685       | 992        | 855        | 720        | 500        | 475        | 190        | 184        | 183        | 137        | 108        | 39         | 35         |
| 85              | At   | 95730                                                                                   | 17485      | 16780      | 14213      | 4315       | 4000       | 3415       | 2905       | 2785       | 1043       | 902        | 760        | 533        | 504        | 212        | 205        | 198        | 150        | 118        | 45         | 42         |
| 86              | Rn   | 98400                                                                                   | 18053      | 17335      | 14615      | 4480       | 4155       | 3535       | 3015       | 2890       | 1095       | 950        | 795        | 565        | 535        | 235        | 230        | 215        | 165        | 129        | 53         | 48         |
| 87              | Fr   | 101135                                                                                  | 18640      | 17905      | 15030      | 4650       | 4320       | 3660       | 3135       | 3000       | 1155       | 1005       | 840        | 604        | 572        | 265        | 255        | 235        | 184        | 144        | 65         | 60         |
| 88              | Ra   | 103920                                                                                  | 19240      | 18490      | 15450      | 4825       | 4490       | 3790       | 3253       | 3110       | 1213       | 1062       | 885        | 640        | 608        | 293        | 285        | 260        | 205        | 158        | 75         | 70         |
| 89              | Ac   | 106760                                                                                  | 19850      | 19090      | 15875      | 5005       | 4660       | 3920       | 3375       | 3225       | 1275       | 1118       | 930        | 680        | 645        | 320        | 312        | 280        | 222        | 173        | 90         | 82         |
| 90              | Th   | 109655                                                                                  | 20475      | 19700      | 16305      | 5187       | 4835       | 4050       | 3495       | 3337       | 1335       | 1173       | 972        | 718        | 682        | 350        | 340        | 295        | 238        | 185        | 100        | 92         |
| 91              | Pa   | 112600                                                                                  | 21115      | 20320      | 16735      | 5372       | 5007       | 4180       | 3610       | 3445       | 1390       | 1228       | 1010       | 748        | 713        | 375        | 365        | 313        | 250        | 190        | 102        | 95         |
| 92              | U    | 115605                                                                                  | 21763      | 20953      | 17170      | 5553       | 5185       | 4308       | 3730       | 3555       | 1445       | 1277       | 1050       | 785        | 743        | 395        | 385        | 328        | 265        | 200        | 110        | 100        |
| 93              | Np   | 118675                                                                                  | 22432      | 21605      | 17615      | 5745       | 5370       | 4440       | 3855       | 3670       | 1505       | 1332       | 1090       | 820        | 775        | 420        | 410        | 345        | 288        | 210        | 115        | 105        |
| 94              | Pu   | 121795                                                                                  | 23103      | 22270      | 18062      | 5938       | 5545       | 4560       | 3975       | 3780       | 1565       | 1383       | 1125       | 852        | 805        | 442        | 430        | 355        | 298        | 220        | 120        | 110        |

### 19.3. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНУТРЕННИХ ОБОЛОЧКАХ АТОМОВ

В табл. 19.5 представлены значения энергии связи электронов, заполняющих внутренние оболочки атомов,— минимальной энергии, затрачиваемой на вырывание электрона из замкнутых внутренних оболочек. После отрыва электрона от атома образующийся ион может оказаться в различных состояниях. Взаимодействие между валентной электронной оболочкой и внутренней оболочкой с вакансией приводит к относительно небольшому расщеплению энергии этих состояний. Приведенные в табл. 19.5 значения энергии связи электронов соответствуют образованию наинизшего по энергии состояния иона.

Энергии связи электронов соответствуют свободным атомам, т. е. отнесены к нулевому потенциалу вакуума. В случае проводящих твердых тел измеряемые значения энергии связи электронов в атомах относятся к уровню Ферми соответствующего проводника. Для пересчета искомой энергии к вакуумному уровню в этом случае требуется к измеренному значению прибавить работу выхода элемента, которая для металлов изменяется в диапазоне от 1,93 эВ (цезий) до 5,36 эВ (платина) и составляет в среднем около 4 эВ.

Наиболее точный метод измерения энергии связи электронов во внутренних оболочках атомов (погрешность  $\leq \pm 0,1$  эВ) основан на рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии газообразных веществ. Кроме того, искомые энергии определяют методами фотопоглощения, рентгеновской эмиссии, оже-спектроскопии и т. д. [9].

В верхней графе табл. 19.5 указаны символы электронных подоболочек атомов, отвечающие разным главным квантовым числам электрона, его орбитальному и полному моментам. При отборе материала для этой таблицы были использованы работы [6,9—16]. Погрешность определения искомых значений энергии учитывалась нами при округлении значащих цифр в пределах  $\pm 1 \div \pm 3$  для последней приведенной цифры.

### 19.4. ЭНЕРГИЯ СРОДСТВА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ К ЭЛЕКТРОНУ

Энергией сродства  $EA$  к электрону называют энергию связи электрона в соответствующем отрицательном

ионе — минимальную энергию, затрачиваемую на отрыв электрона от атома или молекулы. В случае молекулярных частиц под величиной  $EA$  следует понимать энергию, отвечающую переходу между основными колебательными состояниями частиц.

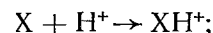
В табл. 19.6 представлены значения энергии сродства атомов к электрону. Наиболее точные современные методы измерения этой величины основаны на анализе порогового поведения сечения лазерного фотоотрыва и лазерной фотоэлектронной спектроскопии [17—20]. В отдельных графах табл. 19.6 приведены электронная конфигурация валентной оболочки иона и соответствующий терм отрицательного иона.

В табл. 19.7 собраны значения  $EA$  двухатомных и более сложных молекулярных частиц. Среди наиболее надежных методов определения этой величины отметим фотоэлектронную спектроскопию, фотоотрыв, перезарядку ионов и столкновительную ионизацию [17, 18, 21, 22].

Для того чтобы дать представление о точности измерения величины  $EA$  для атомов и молекул, мы распределили числовые значения по четырем классам точности:  $A$  — погрешность  $\leq 1\%$ ;  $B$  —  $\leq 3\%$ ;  $C$  —  $\leq 10\%$ ;  $D$  —  $\leq 30\%$ , в соответствии с оценкой использованного метода их получения.

### 19.5. ЭНЕРГИЯ СРОДСТВА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ К ПРОТОНУ

Энергия сродства к протону ( $PA$ ) соответствует энергии, выделяющейся при присоединении к нейтральному атому или молекуле протона ( $H^+$ ), и является основной характеристикой газофазных процессов перехода протона при столкновениях частиц в низкотемпературной плазме. Универсальное определение искомой величины  $PA$  основано на рассмотрении гипотетической реакции



при этом энергия сродства молекулы  $X$  к протону равна изменению энтальпии с обратным знаком для написанной реакции, или если воспользоваться понятием теплоты образования  $\Delta H_f^\circ$  частиц  $X$ ,  $H^+$  и  $XH^+$ , получим

$$PA(X) = \Delta H_f^\circ(X) + \Delta H_f^\circ(H^+) - \Delta H_f^\circ(XH^+);$$

Таблица 19.6. Энергия сродства атомов к электрону (EA)

| Атомный номер Z | Отрицательный ион (электронный терм)            | Конфигурация внешней электронной оболочки | EA, эВ      |
|-----------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|
| 1               | H <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)                | 1s <sup>2</sup>                           | 0,75421 (A) |
| 2               | He <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> P)               | 1s2s2p                                    | 0,077 (B)   |
| 3               | Li <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup>           | 0,618 (A)   |
| 5               | B <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)                | 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>           | 0,28 (C)    |
| 6               | C <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> S)                | 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>           | 1,263 (A)   |
|                 | C <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> D)                | 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>           | 0,035 (B)   |
| 8               | O <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)                | 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>           | 1,46112 (A) |
| 9               | F <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)                | 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>           | 3,40 (A)    |
| 11              | Na <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 3s <sup>2</sup>                           | 0,5479 (A)  |
| 13              | Al <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P <sub>0</sub> ) | 3p <sup>2</sup>                           | 0,44 (B)    |
|                 | Al <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> D <sub>2</sub> ) | 3p <sup>2</sup>                           | 0,33 (B)    |
| 14              | Si <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> S)               | 3p <sup>3</sup>                           | 1,39 (A)    |
|                 | Si <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> D)               | 3p <sup>3</sup>                           | 0,52 (B)    |
|                 | Si <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> P)               | 3p <sup>3</sup>                           | 0,03 (B)    |
| 15              | P <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)                | 3p <sup>4</sup>                           | 0,746 (A)   |
| 16              | S <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> P)                | 3p <sup>5</sup>                           | 2,07712 (A) |
| 17              | Cl <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 3p <sup>6</sup>                           | 3,62 (A)    |
| 19              | K <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)                | 4s <sup>2</sup>                           | 0,5015 (A)  |
| 21              | Sc <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> D)               | 3d4s <sup>2</sup> 4p                      | 0,19 (C)    |
|                 | Sc <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> D)               | 3d4s <sup>2</sup> 4p                      | 0,04 (D)    |
| 22              | Ti <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> F)               | 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>           | 0,08 (D)    |
| 23              | V <sup>-</sup> ( <sup>5</sup> D)                | 3d <sup>4</sup> 4s <sup>2</sup>           | 0,53 (C)    |
| 24              | Cr <sup>-</sup> ( <sup>6</sup> S)               | 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>           | 0,67 (B)    |
| 26              | Fe <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> F)               | 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>           | 0,15 (B)    |
| 27              | Co <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> F)               | 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>           | 0,66 (B)    |
| 28              | Ni <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> D)               | 3d <sup>9</sup> 4s <sup>2</sup>           | 1,16 (A)    |
| 29              | Cu <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>          | 1,23 (A)    |
| 31              | Ga <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)               | 4p <sup>2</sup>                           | 0,3 (D)     |
| 32              | Ge <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> S)               | 4p <sup>3</sup>                           | 1,23 (A)    |
| 33              | As <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)               | 4p <sup>4</sup>                           | 0,80 (C)    |
| 34              | Se <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> P)               | 4p <sup>5</sup>                           | 2,021 (A)   |
| 35              | Br <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 4p <sup>6</sup>                           | 3,37 (A)    |
| 37              | Rb <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 5s <sup>2</sup>                           | 0,4859 (A)  |
| 39              | Y <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> D)                | 4d5s <sup>2</sup> 5p                      | 0,31 (C)    |
|                 | Y <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> D)                | 4d5s <sup>2</sup> 5p                      | 0,16 (D)    |
| 40              | Zr <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> F)               | 4d <sup>3</sup> 5s <sup>2</sup>           | 0,43 (B)    |
| 41              | Nb <sup>-</sup> ( <sup>5</sup> D)               | 4d <sup>4</sup> 5s <sup>2</sup>           | 0,89 (B)    |
| 42              | Mo <sup>-</sup> ( <sup>6</sup> S)               | 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>           | 0,75 (B)    |
| 43              | Tc <sup>-</sup> ( <sup>5</sup> D)               | 4d <sup>6</sup> 5s <sup>2</sup>           | 0,6 (D)     |
| 44              | Ru <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> F)               | 4d <sup>7</sup> 5s <sup>2</sup>           | 1,1 (D)     |
| 45              | Rh <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> F)               | 4d <sup>8</sup> 5s <sup>2</sup>           | 1,14 (A)    |
| 46              | Pd <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> D)               | 4d <sup>9</sup> 5s <sup>2</sup>           | 0,56 (B)    |
| 47              | Ag <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>          | 1,30 (A)    |
| 49              | In <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)               | 5p <sup>2</sup>                           | 0,3 (D)     |
| 50              | Sn <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> S)               | 5p <sup>3</sup>                           | 1,11 (A)    |
| 51              | Sb <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)               | 5p <sup>4</sup>                           | 1,1 (C)     |
| 52              | Te <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> P)               | 5p <sup>5</sup>                           | 1,971 (A)   |
| 53              | I <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)                | 5p <sup>6</sup>                           | 3,059 (A)   |
| 55              | Cs <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 6s <sup>2</sup>                           | 0,4716 (A)  |
| 57              | La <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> F)               | 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>           | 0,5 (D)     |
| 73              | Ta <sup>-</sup> ( <sup>5</sup> D)               | 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>           | 0,32 (C)    |
| 74              | W <sup>-</sup> ( <sup>6</sup> S)                | 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>           | 0,82 (A)    |
| 75              | Re <sup>-</sup> ( <sup>5</sup> D)               | 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>           | 0,15 (D)    |
| 76              | Os <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> F)               | 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>           | 1,4 (D)     |
| 77              | Ir <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> F)               | 5d <sup>8</sup> 6s <sup>2</sup>           | 1,57 (A)    |
| 78              | Pt <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> D)               | 5d <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>           | 2,13 (A)    |
| 79              | Au <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>          | 2,3086 (A)  |
| 81              | Tl <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)               | 6p <sup>2</sup>                           | 0,3 (D)     |
| 82              | Pb <sup>-</sup> ( <sup>4</sup> S)               | 6p <sup>3</sup>                           | 0,37 (B)    |
| 83              | Bi <sup>-</sup> ( <sup>3</sup> P)               | 6p <sup>4</sup>                           | 0,95 (B)    |
| 84              | Po <sup>-</sup> ( <sup>2</sup> P)               | 6p <sup>5</sup>                           | 1,9 (D)     |
| 85              | At <sup>-</sup> ( <sup>1</sup> S)               | 6p <sup>6</sup>                           | 2,9 (D)     |

Таблица 19.7. Энергия сродства молекул к электрону (EA)

| Молекула             | EA, эВ     | Молекула                | EA, эВ    |
|----------------------|------------|-------------------------|-----------|
| Двухатомные молекулы |            | Трехатомные молекулы    |           |
| Al <sub>2</sub>      | 2,42 (C)   | AlF <sub>2</sub>        | 2,3 (C)   |
| AlO                  | 3,6 (C)    | AlO <sub>2</sub>        | 4,1 (C)   |
| AsBr                 | 1,3 (C)    | AsBr <sub>2</sub>       | 3,5 (C)   |
| AsCl                 | 1,3 (C)    | AsCl <sub>2</sub>       | 2,2 (C)   |
| AsF                  | 1,3 (C)    | AsF <sub>2</sub>        | 0,8 (D)   |
| AsH                  | 1,0 (D)    | AsH <sub>2</sub>        | 1,27 (B)  |
| BO                   | 3,0 (C)    | BF <sub>2</sub>         | 2,2 (C)   |
| Be <sub>2</sub>      | 0,3 (D)    | BO <sub>2</sub>         | 4,0 (C)   |
| BeH                  | 0,7 (D)    | C <sub>3</sub>          | 2,5 (C)   |
| BeO                  | 1,8 (C)    | CF <sub>2</sub>         | 2,1 (D)   |
| Br <sub>2</sub>      | 2,6 (C)    | C <sub>2</sub> H        | 3,73 (B)  |
| C <sub>2</sub>       | 3,39 (B)   | CH <sub>2</sub>         | 0,65 (A)  |
| CBr                  | 1,7 (C)    | CNS                     | 2,0 (C)   |
| CF                   | 3,3 (C)    | COS                     | 0,5 (D)   |
| CH                   | 1,24 (A)   | CS <sub>2</sub>         | 0,85 (D)  |
| CN                   | 3,82 (A)   | CoH <sub>2</sub>        | 1,45 (A)  |
| CS                   | 0,21 (C)   | FCN                     | 4,0 (D)   |
| CaH                  | 0,93 (C)   | FeH <sub>2</sub>        | 1,05 (B)  |
| Cl <sub>2</sub>      | 2,44 (B)   | GeF <sub>2</sub>        | 1,3 (D)   |
| ClO                  | 2,0 (D)    | HNO                     | 0,34 (C)  |
| CsCl                 | 0,45 (B)   | LiCN                    | 0,74 (D)  |
| F <sub>2</sub>       | 2,96 (B)   | LiNC                    | 0,62 (D)  |
| FeO                  | 1,49 (B)   | LiOH                    | 0,22 (D)  |
| I <sub>2</sub>       | 2,51 (B)   | MnH <sub>2</sub>        | 0,44 (C)  |
| IBr                  | 2,6 (C)    | NCO                     | 2,6 (D)   |
| ICl                  | 2,8 (C)    | NH <sub>2</sub>         | 0,757 (B) |
| KBr                  | 0,64 (B)   | NF <sub>2</sub>         | 1,7 (D)   |
| KCl                  | 0,58 (B)   | NO <sub>2</sub>         | 2,42 (B)  |
| KI                   | 0,73 (B)   | N <sub>2</sub> O        | 0,24 (D)  |
| Li <sub>2</sub>      | 0,7 (D)    | NiH <sub>2</sub>        | 1,93 (A)  |
| LiCl                 | 0,59 (B)   | O <sub>3</sub>          | 2,103 (A) |
| LiF                  | 0,44 (C)   | P <sub>3</sub>          | 0,9 (D)   |
| LiH                  | 0,3 (D)    | PH <sub>2</sub>         | 1,27 (A)  |
| LiN                  | 0,4 (D)    | PF <sub>2</sub>         | 1,4 (C)   |
| MgH                  | 1,05 (C)   | S <sub>3</sub>          | 2,09 (B)  |
| NH                   | 0,3744 (A) | SCN                     | 2,2 (D)   |
| NO                   | 0,03 (D)   | SH <sub>2</sub>         | 1,1 (C)   |
| NS                   | 1,19 (A)   | SO <sub>2</sub>         | 1,11 (A)  |
| NaBr                 | 0,79 (B)   | S <sub>2</sub> O        | 1,88 (A)  |
| NaCl                 | 0,73 (B)   | SeCN                    | 2,6 (C)   |
| NaF                  | 0,52 (B)   | SiH <sub>2</sub>        | 1,12 (B)  |
| NaI                  | 0,86 (B)   | SiCN                    | 2,6 (C)   |
| NaH                  | 0,32 (D)   | SiH <sub>2</sub>        | 1,12 (B)  |
| O <sub>2</sub>       | 0,440 (B)  | Четырехатомные молекулы |           |
| OH                   | 1,8277 (A) | CCl <sub>3</sub>        | 1,2 (D)   |
| OD                   | 1,8255 (A) | CF <sub>3</sub>         | 1,92 (C)  |
| P <sub>2</sub>       | 0,59 (C)   | CH <sub>3</sub>         | 1,07 (B)  |
| PH                   | 1,03 (A)   | CO <sub>2</sub>         | 2,82 (B)  |
| PO                   | 1,09 (B)   | GeF <sub>3</sub>        | 3,0 (D)   |
| RbCl                 | 0,54 (B)   | FeF <sub>3</sub>        | 3,6 (C)   |
| S <sub>2</sub>       | 1,66 (B)   | MnF <sub>3</sub>        | 4,4 (C)   |
| SF                   | 2,5 (C)    | NO <sub>3</sub>         | 3,7 (B)   |
| SH                   | 2,31 (A)   | PBr <sub>3</sub>        | 1,6 (D)   |
| SO                   | 1,09 (C)   | PBr <sub>2</sub> Cl     | 1,6 (D)   |
| SeH                  | 2,2125 (A) | PBrCl <sub>2</sub>      | 1,5 (C)   |
| SeO                  | 1,46 (B)   | PCl <sub>3</sub>        | 0,8 (D)   |
| SiH                  | 1,28 (A)   | POCl <sub>2</sub>       | 3,8 (C)   |
| TeH                  | 2,10 (A)   | SF <sub>3</sub>         | 2,9 (C)   |
| ZnH                  | 0,95 (D)   | SO <sub>3</sub>         | 1,7 (C)   |
|                      |            | SO <sub>2</sub> F       | 2,8 (C)   |

| Молекула                        | EA, эВ   | Молекула                              | EA, эВ   |
|---------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
| SiF <sub>3</sub>                | 2,7 (C)  | Шестнатомные и более сложные молекулы |          |
| SiH <sub>3</sub>                | 1,4 (D)  | C <sub>3</sub> F <sub>3</sub>         | 4,0 (D)  |
| UF <sub>3</sub>                 | 1,5 (D)  | C <sub>3</sub> H <sub>3</sub>         | 2,3 (D)  |
| Пятиатомные молекулы            |          | MoF <sub>5</sub>                      | 3,3 (C)  |
| CCl <sub>3</sub> F              | 1,1 (D)  | PtF <sub>5</sub>                      | 6,5 (C)  |
| CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> | 0,4 (D)  | SF <sub>5</sub>                       | 3,7 (C)  |
| CD <sub>3</sub> O               | 1,55 (B) | UF <sub>5</sub>                       | 4,0 (C)  |
| C <sub>2</sub> F <sub>3</sub>   | 2,0 (D)  | C <sub>2</sub> Cl <sub>5</sub>        | 1,6 (D)  |
| CF <sub>3</sub> Br              | 0,9 (D)  | C <sub>2</sub> F <sub>5</sub>         | 2,2 (C)  |
| CF <sub>2</sub> CO              | 2,4 (D)  | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>         | 0,89 (C) |
| CF <sub>3</sub> I               | 1,5 (C)  | C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> N       | 1,7 (D)  |
| CF <sub>3</sub> O               | 1,4 (D)  | Fe <sub>2</sub> F <sub>5</sub>        | 4 (D)    |
| CF <sub>3</sub> S               | 1,8 (D)  | IrF <sub>6</sub>                      | 4,3 (C)  |
| CH <sub>3</sub> Br              | 0,4 (D)  | MoF <sub>6</sub>                      | 4,2 (C)  |
| CH <sub>3</sub> O               | 1,57 (B) | OsF <sub>6</sub>                      | 4,1 (D)  |
| CH <sub>3</sub> S               | 1,6 (D)  | PtF <sub>6</sub>                      | 8,0 (C)  |
| CO <sub>4</sub>                 | 1,22 (C) | ReF <sub>6</sub>                      | 3,9 (D)  |
| LiCH <sub>3</sub>               | 0,24 (D) | SF <sub>6</sub>                       | 0,55 (C) |
| CeF <sub>4</sub>                | 3,6 (C)  | SeF <sub>6</sub>                      | 3,0 (C)  |
| FeF <sub>4</sub>                | 5,4 (C)  | TeF <sub>6</sub>                      | 3,3 (B)  |
| HNO <sub>3</sub>                | 0,6 (D)  | UF <sub>6</sub>                       | 5,0 (B)  |
| MnF <sub>4</sub>                | 5,3 (C)  | WF <sub>6</sub>                       | 4,3 (C)  |
| OH · H <sub>2</sub> O           | 1,95 (C) | C <sub>3</sub> F <sub>5</sub>         | 2,2 (D)  |
| POCl <sub>3</sub>               | 1,4 (D)  | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O       | 0,6 (D)  |
| PtF <sub>4</sub>                | 5,2 (C)  | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> S       | 1,4 (D)  |
| SF <sub>4</sub>                 | 2,35 (B) | Fe <sub>2</sub> F <sub>6</sub>        | 4,4 (C)  |
| UF <sub>4</sub>                 | 1,7 (D)  | C <sub>4</sub> F <sub>5</sub>         | 1,0 (D)  |
|                                 |          | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N       | 1,0 (D)  |
|                                 |          | C <sub>3</sub> F <sub>7</sub>         | 2,2 (C)  |
|                                 |          | C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>         | 0,6 (D)  |
|                                 |          | C <sub>5</sub> H <sub>5</sub>         | 1,79 (B) |
|                                 |          | C <sub>6</sub> Cl <sub>5</sub>        | 2,8 (C)  |
|                                 |          | C <sub>4</sub> F <sub>7</sub>         | 3,1 (D)  |
|                                 |          | C <sub>6</sub> F <sub>5</sub>         | 2,74 (C) |
|                                 |          | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>         | 2,3 (C)  |
|                                 |          | C <sub>6</sub> F <sub>6</sub>         | 0,5 (D)  |

здесь теплота образования отнесена к элементам в их стандартных состояниях.

Основные методы определения *РА* основаны на измерениях константы равновесия для реакций с передачей протона путем использования масс-спектрометров высокого давления, ионного циклотронного резонанса или проточной техники исследования послесвечения плазмы и др. [23—25].

В табл. 19.8 включены значения *РА* для атомов, которые соответствуют энергии диссоциации молекулярного иона гидрида из основного колебательного состояния. В табл. 19.9 представлены значения *РА* для ряда простейших молекул, распространенных в газовой фазе. Основная информация об энергии сродства атомов и молекул к протону содержится в [22—25]. Чтобы дать представление о погрешностях в измерении *РА*, мы распределили числовые данные по четырем классам точности: *A* — погрешность ≤ 1%; *B* — ≤ 3%; *C* ≤ 10%; *D* — ≤ 30%.

Таблица 19.8. Энергия сродства атомов к протону (*РА*)

| Атом | РА, эВ    | Атом | РА, эВ   |
|------|-----------|------|----------|
| Ag   | 3,87 (A)  | I    | 6,31 (B) |
| Br   | 5,73 (B)  | Kr   | 4,41 (B) |
| Cl   | 5,34 (B)  | N    | 3,4 (C)  |
| Cs   | 7,59 (B)  | Ne   | 2,08 (B) |
| F    | 3,42 (A)  | O    | 5,1 (B)  |
| H    | 2,651 (A) | S    | 6,87 (B) |
| He   | 1,845 (A) | Xe   | 5,15 (B) |
|      |           | Zn   | 6,77 (B) |

Таблица 19.9. Энергия сродства молекул к протону (*РА*)

| Молекула                    | РА, эВ   | Молекула          | РА, эВ   |
|-----------------------------|----------|-------------------|----------|
| Двухатомные молекулы        |          |                   |          |
| CO                          | 6,15 (A) | HI                | 6,3 (C)  |
| CN                          | 5 (D)    | HS                | 7,2 (C)  |
| CS                          | 8,2 (A)  | N <sub>2</sub>    | 4,8 (C)  |
| H <sub>2</sub>              | 4,40 (B) | NH                | 6,1 (C)  |
| <sup>2</sup> H <sub>2</sub> | 4,56 (B) | NO                | 5,50 (B) |
| HBr                         | 6,10 (A) | O <sub>2</sub>    | 4,10 (B) |
| HCl                         | 5,86 (B) | OH                | 6,2 (C)  |
| HF                          | 4,09 (B) |                   |          |
| Трехатомные молекулы        |          |                   |          |
| CH <sub>2</sub>             | 8,6 (B)  | H <sub>2</sub> Se | 7,4 (B)  |
| CO <sub>2</sub>             | 5,5 (B)  | H <sub>2</sub> Te | 7,6 (B)  |
| HCN                         | 7,46 (A) | NH <sub>2</sub>   | 8,1 (B)  |
| H <sub>2</sub> O            | 7,23 (B) | NO <sub>2</sub>   | 6,6 (B)  |
| HO <sub>2</sub>             | 6,4 (C)  | N <sub>2</sub> O  | 5,8 (B)  |
| H <sub>2</sub> S            | 7,4 (B)  | PH <sub>2</sub>   | 7,2 (C)  |
|                             |          | SiH <sub>2</sub>  | 8,7 (B)  |

Четырехатомные и более сложные молекулы

|                               |          |                               |         |
|-------------------------------|----------|-------------------------------|---------|
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 5,5 (C)  | CH <sub>3</sub> Cl            | 6,9 (C) |
| CH <sub>3</sub>               | 5,4 (C)  | CH <sub>4</sub>               | 5,4 (B) |
| H <sub>2</sub> CS             | 8,0 (A)  | GeH <sub>4</sub>              | 7,1 (B) |
| HNO <sub>2</sub>              | 8,1 (C)  | HNO <sub>3</sub>              | 7,5 (B) |
| (HF) <sub>2</sub>             | 5,2 (C)  | SiH <sub>4</sub>              | 6,6 (B) |
| NF <sub>3</sub>               | 6,6 (C)  | TiCl <sub>4</sub>             | 7,6 (B) |
| NH <sub>3</sub>               | 8,9 (A)  | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 6,6 (B) |
| N <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 7,9 (C)  | (HF) <sub>3</sub>             | 5,8 (C) |
| PH <sub>3</sub>               | 8,07 (A) | SF <sub>6</sub>               | 3,7 (C) |
| SO <sub>3</sub>               | 6,2 (B)  | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 6,9 (B) |
| CF <sub>4</sub>               | 5,2 (C)  |                               |         |

## 19.6. ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ЭЛЕКТРОНАМИ

Сечение *i*-кратной ионизации  $\sigma^{i+}$  есть отношение вероятности образования в единицу времени иона кратности *i* к плотности потока электронов. Сечение полной ионизации  $\sigma_n$  связано с  $\sigma^{i+}$  соотношением  $\sigma_n = \sigma^+ + 2\sigma^{2+} + 3\sigma^{3+} + \dots$ . При энергии электронов, меньшей порога двукратной ионизации,  $\sigma_n$  совпадает с  $\sigma^+$ . Полное сечение ионизации определяет вероятность образования в единицу времени полного (суммарного) положительного

Таблица 19.10. Константы  $a$ ,  $b$  и  $c$  эмпирической формулы (19.2) для сечений ионизации оболочек атомов. Постоянная  $n$  может принимать значения 4, 5, 6 и 7 для  $s$ -оболочек; 4, 5 и 6 для  $p$ -оболочек; 5 и 6 для  $d$ -оболочек; 4 и 5 для  $f$ -оболочек, константа  $a$  имеет единицу  $10^{-14}$  см<sup>2</sup> · эВ<sup>2</sup>

| Константа | 1s   | 1s <sup>2</sup> | 2p   | 2p <sup>2</sup> | 2p <sup>3</sup> | 2p <sup>4</sup> | 2p <sup>5</sup> | 2p <sup>6</sup> | 3d              | 3d <sup>2</sup> | 3d <sup>3</sup> | 3d <sup>4</sup>  | 3d <sup>5</sup>  | 3d <sup>6</sup>  | 3d <sup>7</sup>  | 3d <sup>8</sup>  | 3d <sup>9</sup> | 3d <sup>10</sup> |
|-----------|------|-----------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| a         | 4    | 4               | 3,8  | 3,5             | 3,2             | 3,0             | 2,8             | 2,6             | 3,7             | 3,4             | 3,1             | 2,8              | 2,5              | 2,2              | 2,0              | 1,8              | 1,6             | 1,4              |
| b         | 0,60 | 0,75            | 0,6  | 0,7             | 0,8             | 0,85            | 0,90            | 0,92            | 0,6             | 0,7             | 0,8             | 0,85             | 0,90             | 0,92             | 0,93             | 0,94             | 0,95            | 0,96             |
| c         | 0,56 | 0,50            | 0,4  | 0,3             | 0,25            | 0,22            | 0,20            | 0,19            | 0,4             | 0,3             | 0,25            | 0,20             | 0,18             | 0,17             | 0,16             | 0,15             | 0,14            | 0,13             |
| Константа | 2s   | 2s <sup>2</sup> | 3p   | 3p <sup>2</sup> | 3p <sup>3</sup> | 3p <sup>4</sup> | 3p <sup>5</sup> | 3p <sup>6</sup> | 4d              | 4d <sup>2</sup> | 4d <sup>3</sup> | 4d <sup>4</sup>  | 4d <sup>5</sup>  | 4d <sup>6</sup>  | 4d <sup>7</sup>  | 4d <sup>8</sup>  | 4d <sup>9</sup> | 4d <sup>10</sup> |
| a         | 4    | 4               | 4    | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 3,8             | 3,5             | 3,2              | 3,0              | 2,8              | 2,6              | 2,4              | 2,2             | 2,0              |
| b         | 0,3  | 0,5             | 0,35 | 0,40            | 0,45            | 0,50            | 0,55            | 0,6             | 0,3             | 0,45            | 0,6             | 0,7              | 0,8              | 0,85             | 0,90             | 0,92             | 0,93            | 0,94             |
| c         | 0,6  | 0,6             | 0,6  | 0,6             | 0,6             | 0,5             | 0,45            | 0,4             | 0,6             | 0,5             | 0,4             | 0,3              | 0,25             | 0,20             | 0,18             | 0,17             | 0,16            | 0,15             |
| Константа | 3s   | 3s <sup>2</sup> | np   | np <sup>2</sup> | np <sup>3</sup> | np <sup>4</sup> | np <sup>5</sup> | np <sup>6</sup> | nd              | nd <sup>2</sup> | nd <sup>3</sup> | nd <sup>4</sup>  | nd <sup>5</sup>  | nd <sup>6</sup>  | nd <sup>7</sup>  | nd <sup>8</sup>  | nd <sup>9</sup> | nd <sup>10</sup> |
| a         | 4    | 4               | 4    | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 4               | 3,8             | 3,6              | 3,4              | 3,2              | 3,0              | 2,8              | 2,6             | 2,4              |
| b         | 0    | 0,3             | 0    | 0               | 0,2             | 0,3             | 0,4             | 0,5             | 0               | 0,2             | 0,3             | 0,45             | 0,6              | 0,7              | 0,8              | 0,85             | 0,90            | 0,92             |
| c         | 0    | 0,6             | 0    | 0               | 0,6             | 0,6             | 0,6             | 0,5             | 0               | 0,6             | 0,6             | 0,5              | 0,4              | 0,3              | 0,25             | 0,20             | 0,18            | 0,17             |
| Константа | ns   | ns <sup>2</sup> | nf   | nf <sup>2</sup> | nf <sup>3</sup> | nf <sup>4</sup> | nf <sup>5</sup> | nf <sup>6</sup> | nf <sup>7</sup> | nf <sup>8</sup> | nf <sup>9</sup> | nf <sup>10</sup> | nf <sup>11</sup> | nf <sup>12</sup> | nf <sup>13</sup> | nf <sup>14</sup> |                 |                  |
| a         | 4    | 4               | 3,7  | 3,4             | 3,1             | 2,8             | 2,5             | 2,2             | 2,0             | 1,8             | 1,6             | 1,4              | 1,3              | 1,2              | 1,1              | 1,0              |                 |                  |
| b         | 0    | 0               | 0,6  | 0,7             | 0,8             | 0,85            | 0,90            | 0,92            | 0,93            | 0,94            | 0,95            | 0,96             | 0,96             | 0,97             | 0,97             | 0,97             |                 |                  |
| c         | 0    | 0               | 0,4  | 0,3             | 0,25            | 0,20            | 0,18            | 0,17            | 0,16            | 0,15            | 0,14            | 0,13             | 0,12             | 0,12             | 0,11             | 0,11             |                 |                  |

заряда и в случае ионизации молекул включает также диссоциативную ионизацию электронами.

При энергии электронов  $E$ , значительно превышающей потенциал ионизации  $U_\alpha$  оболочки  $\alpha$  атома, сечение ионизации описывается соотношением Бете [26, 27]

$$\sigma_\alpha^+ = a_\alpha q_\alpha \ln(E/U_\alpha)/EU_\alpha, \quad (19.1)$$

где  $a_\alpha$  — константа, значение которой, как показывает сравнение с экспериментом, при  $E \gg U_\alpha$  может изменяться от 2,6 до  $4,5 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> · эВ<sup>2</sup> [27];  $q_\alpha$  — число эквивалентных электронов на оболочке  $\alpha$ . Формула Бете лежит в основе многих эмпирических соотношений, используемых для аппроксимации сечений ионизации ато-

мов. Наиболее часто для сечений однократной ионизации атомов из основного состояния используется аппроксимация, предложенная Лютцем [27, 28]:

$$\sigma^+ = \sum_{\alpha} a_{\alpha} q_{\alpha} \frac{\ln(E/U_{\alpha})}{EU_{\alpha}} \times \{1 - b_{\alpha} \exp[c_{\alpha} - (E/U_{\alpha} - 1)]\}, \quad (19.2)$$

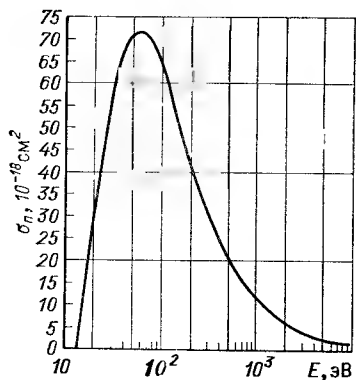


Рис. 19.1. Сечение ионизации Н (относительная погрешность  $\pm 7\%$ ) [31]

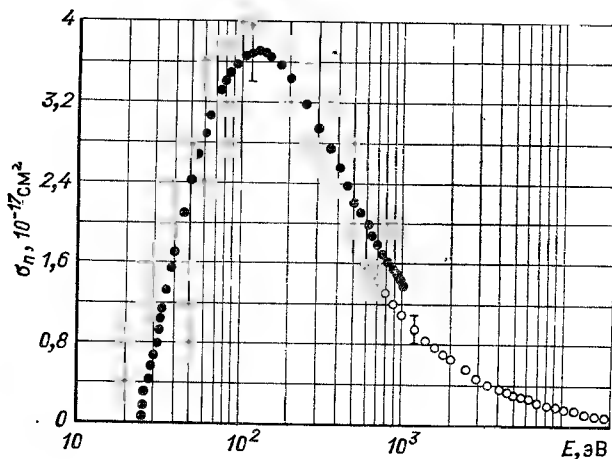


Рис. 19.2. Сечение ионизации Ne: ● — [32]; ○ — [33]

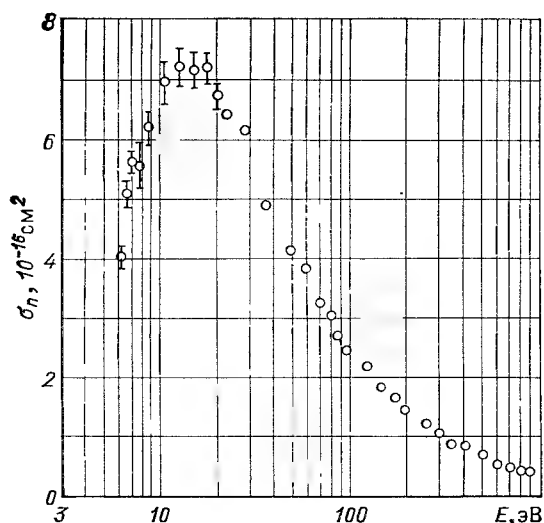


Рис. 19.3. Полное сечение ионизации Ne из метастабильного состояния  $2^3S$  [34]

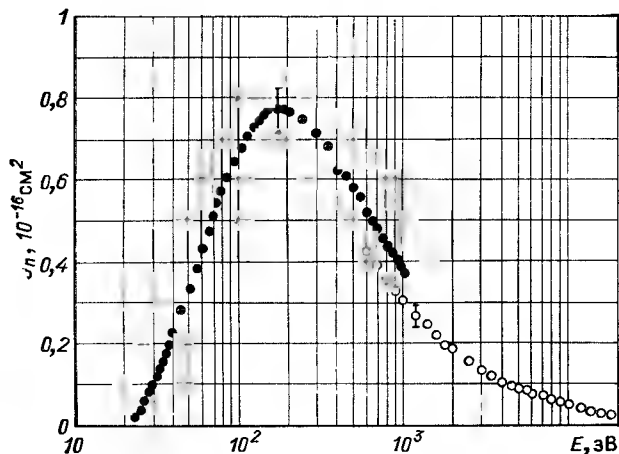


Рис. 19.4. Сечение ионизации Ne:  
● — [32]; ○ — [33]

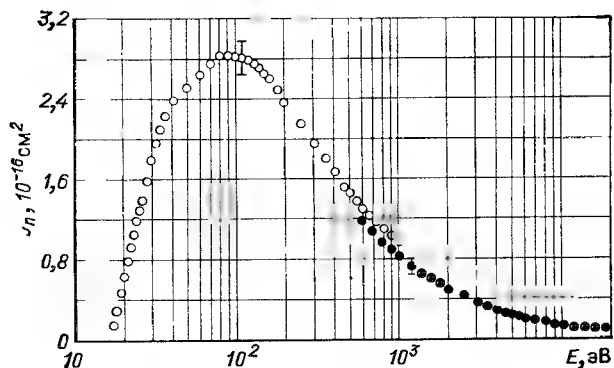


Рис. 19.5. Сечение ионизации Ag:  
○ — [32]; ● — [33]

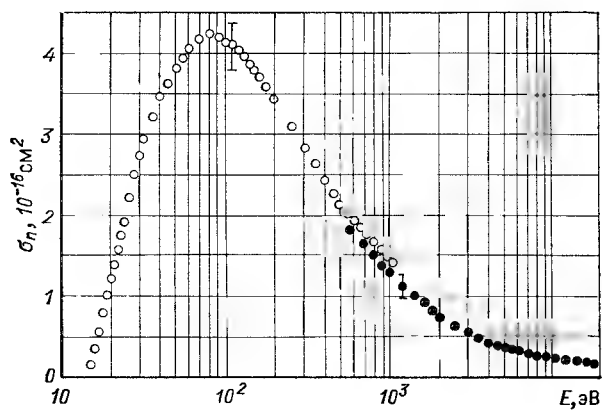


Рис. 19.6. Сечение ионизации Kr:  
○ — [32]; ● — [33]

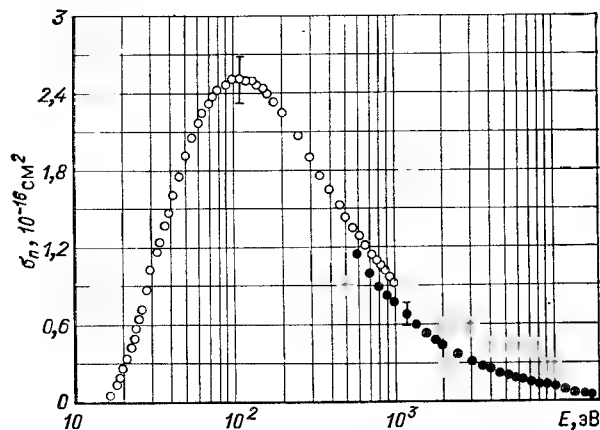


Рис. 19.7. Сечение ионизации Xe:  
○ — [32]; ● — [33]

где  $a_a$ ,  $b_a$  и  $c_a$  — постоянные для данной оболочки, определяемые из сравнения с экспериментом. В табл. 19.10 приведены эти постоянные для различных оболочек атомов [28]. Погрешность аппроксимации составляет 40–30% [28], она может превышать эти значения вблизи порога ионизации и максимума сечения. Аппроксимация не учитывает вклад в суммарное сечение ионизации возбуждения автоионизационных состояний атомов. На рис. 19.1–19.34 приведены значения сечения для элементов и молекул.

Удобные для практического использования аппроксимации результатов расчетов в борновском приближении сечений и скоростей ионизации ряда атомов и атомарных ионов приведены в монографиях Л. А. Вайнштейна и др. [29, 30].

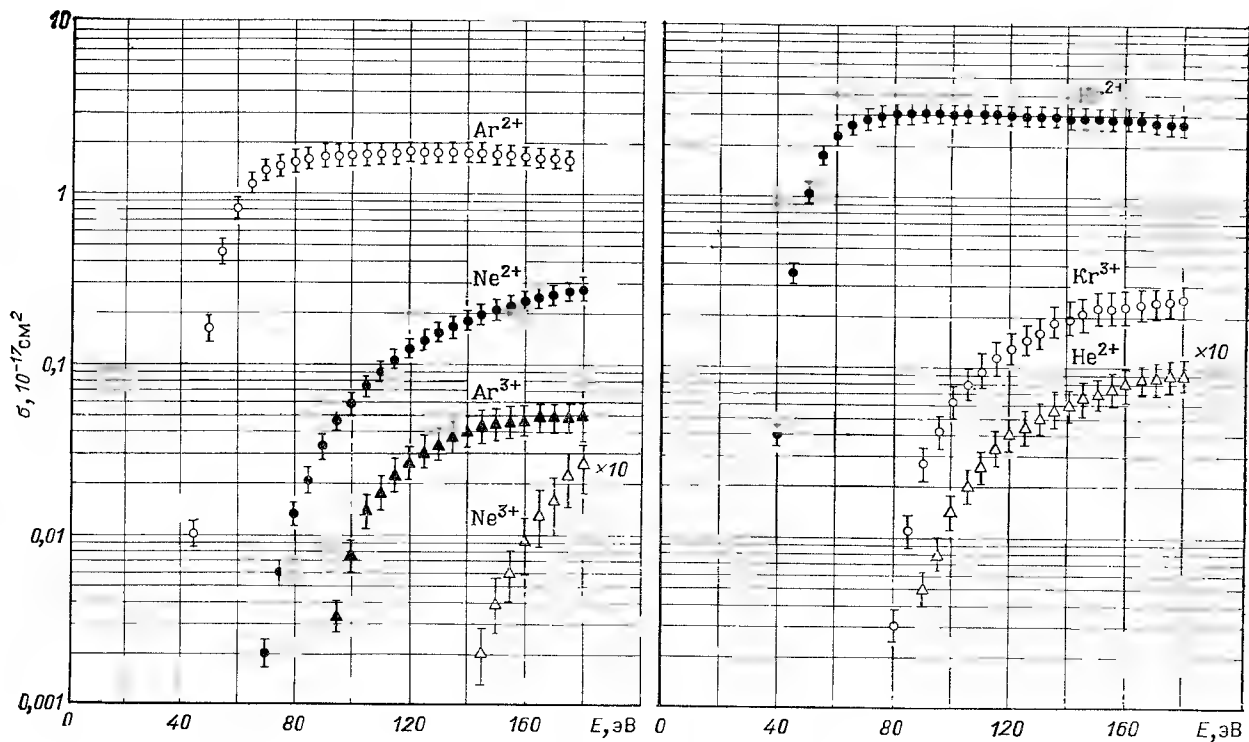


Рис. 19.8. Сечение многократной ионизации инертных газов [35]

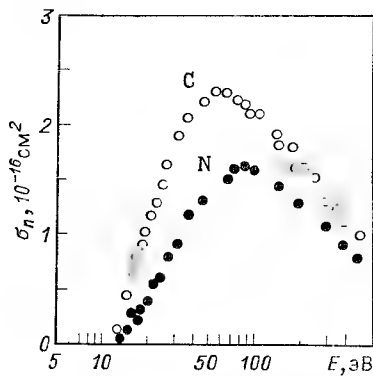


Рис. 19.9. Полные сечения ионизации С и N [36]

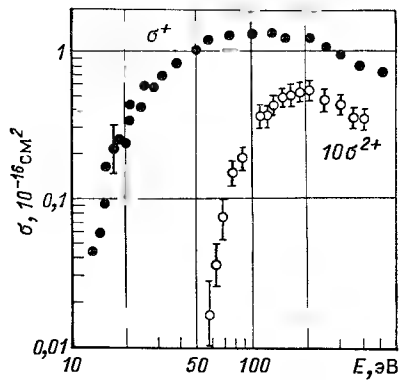


Рис. 19.10. Сечения ионизации O:  
 $\sigma^+$  — [36];  $\sigma^{2+}$  — [37]

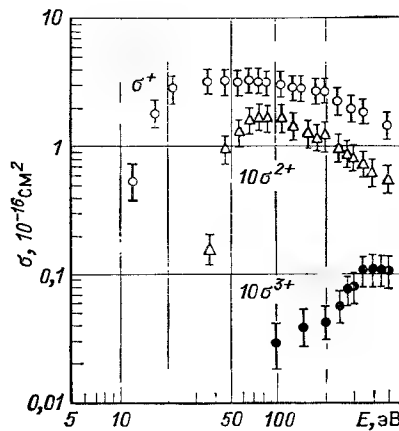


Рис. 19.11. Сечения ионизации S [38]

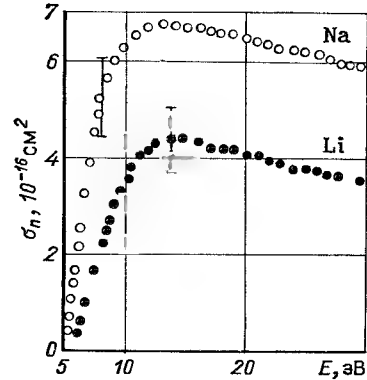


Рис. 19.12. Полные сечения ионизации Li и Na [39]



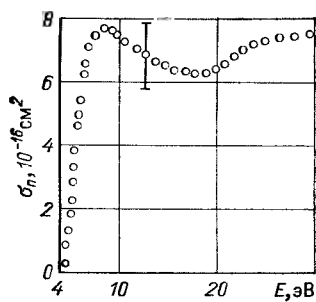


Рис. 19.13. Полное сечение ионизации К [39]

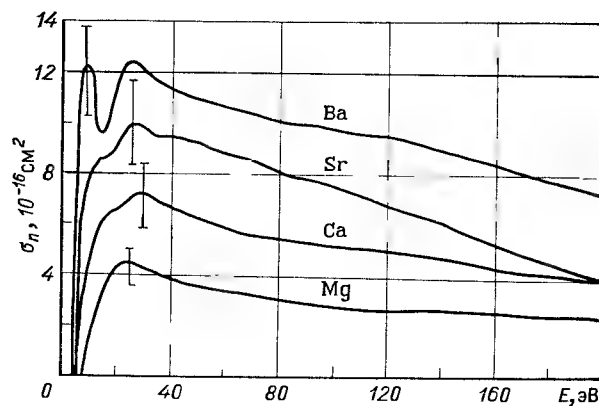


Рис. 19.16. Полные сечения ионизации щелочноземельных металлов [42]

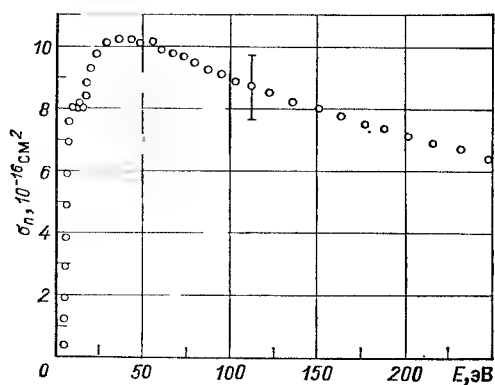


Рис. 19.14. Полное сечение ионизации Rb [40]

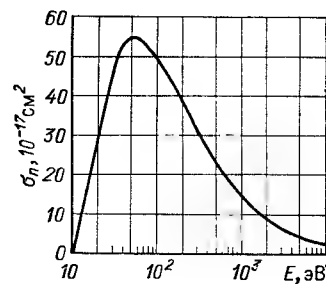


Рис. 19.17. Полное сечение ионизации Hg (относительная погрешность  $\pm 20\%$ ) [43, 44]

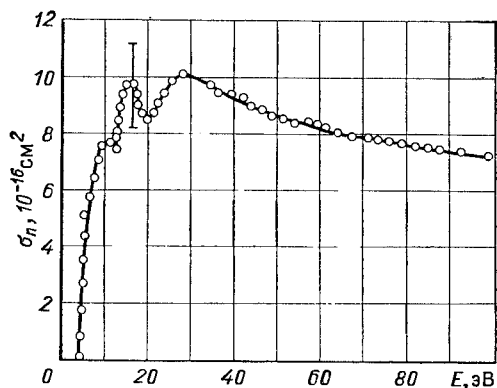


Рис. 19.15. Полное сечение ионизации Cs [41]

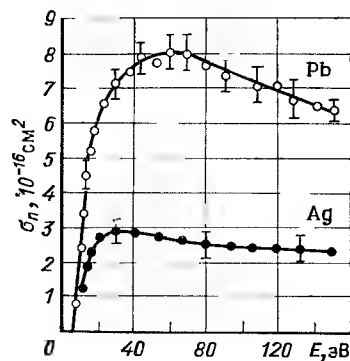


Рис. 19.18. Полное сечение ионизации Pb и Ag [45]

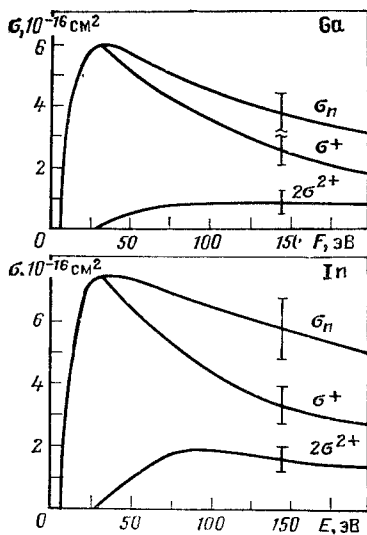


Рис. 19.19. Сечение ионизации Ga и In [46]

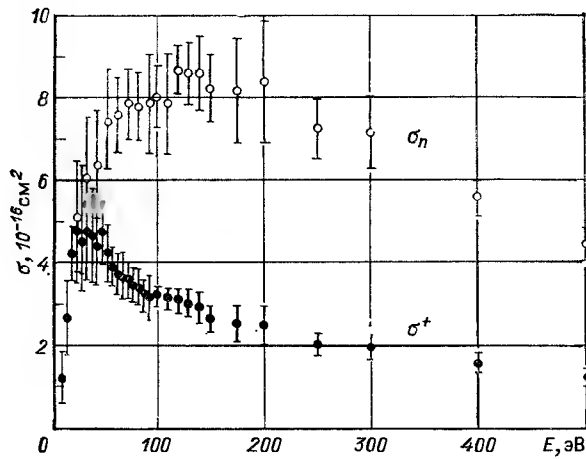


Рис. 19.20. Сечение полной и однократной ионизации U [47]

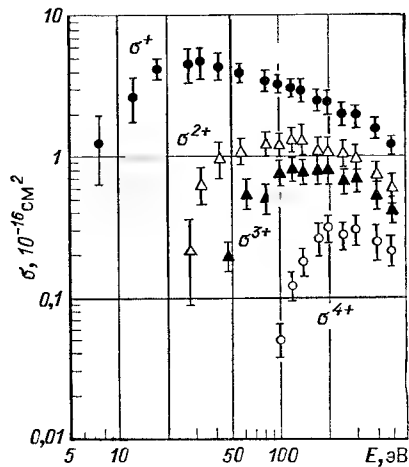


Рис. 19.21. Сечение многократной ионизации U [47]

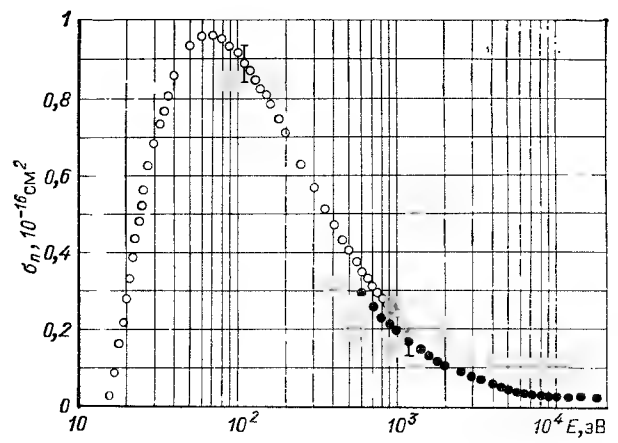


Рис. 19.22. Полное сечение ионизации N<sub>2</sub>:  
○ — [32]; ● — [33]

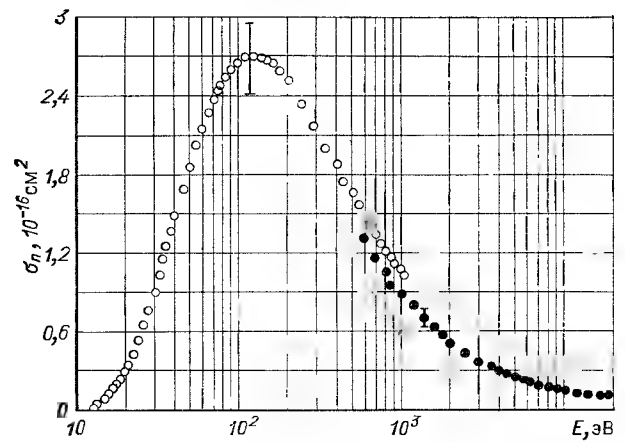


Рис. 19.23. Полное сечение ионизации N<sub>2</sub>:  
○ — [32]; ● — [33]

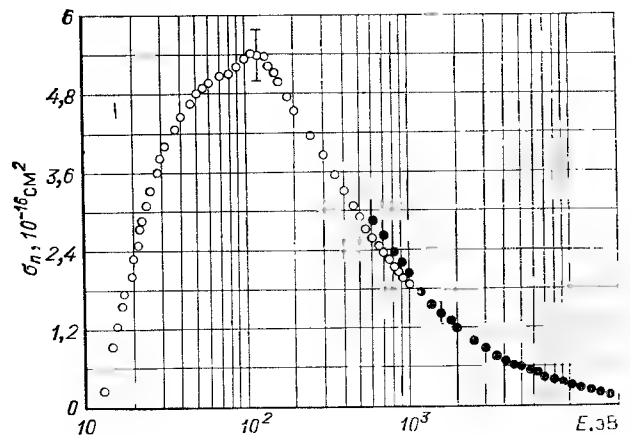


Рис. 19.24. Полное сечение ионизации O<sub>2</sub>:  
○ — [32]; ● — [33]

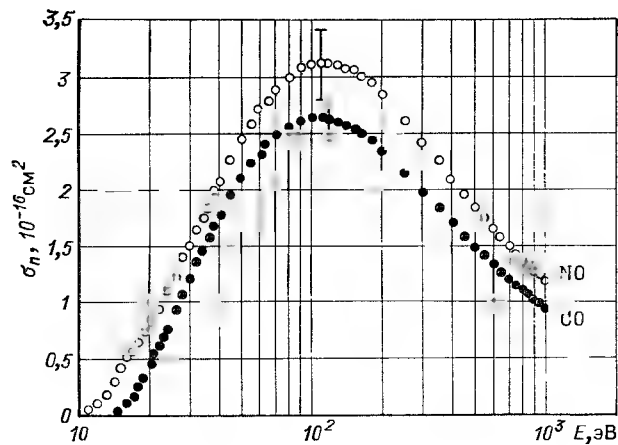


Рис. 19.25. Полное сечение ионизации CO и NO [32]

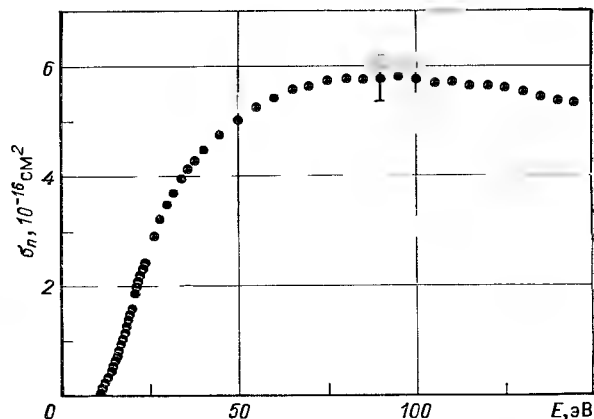


Рис. 19.28. Полное сечение ионизации C₂H₄ [32]

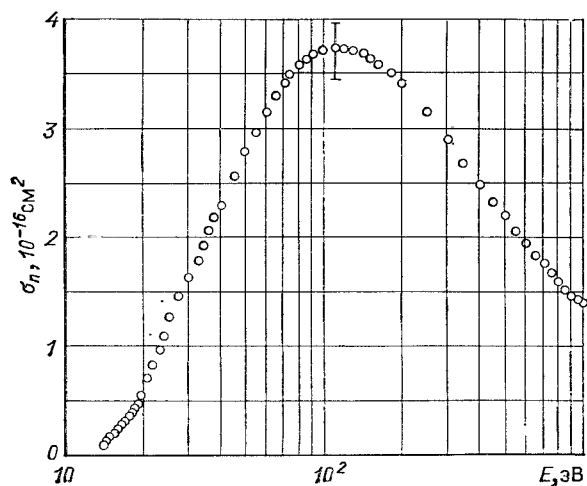


Рис. 19.26. Полное сечение ионизации N₂O [32]

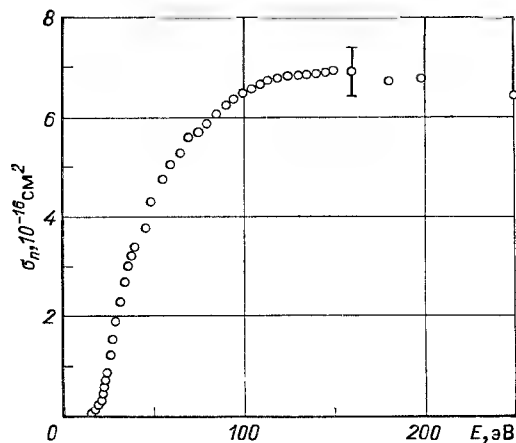


Рис. 19.29. Полное сечение ионизации SF₆ [32]

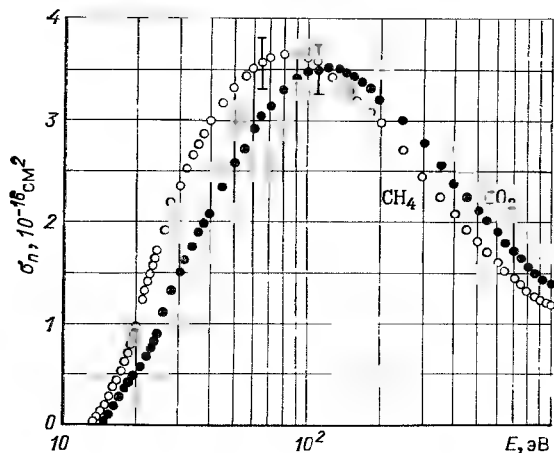


Рис. 19.27. Полное сечение ионизации CO₂ и CH₄ [32]

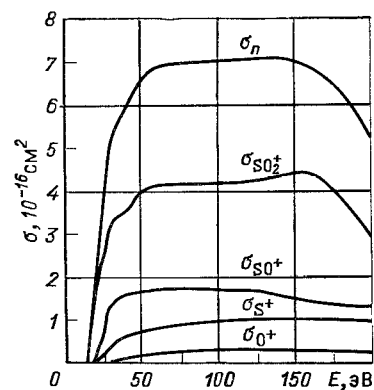


Рис. 19.30. Сечение полной и диссоциативной ионизации SO₂ [48]

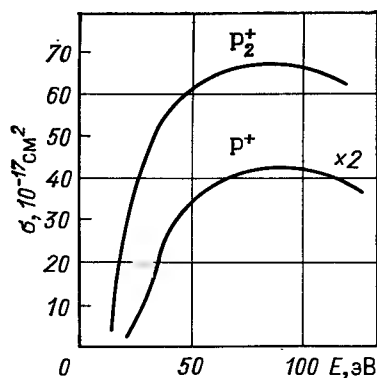


Рис. 19.31. Сечение ионизации  $P_2$  [49]

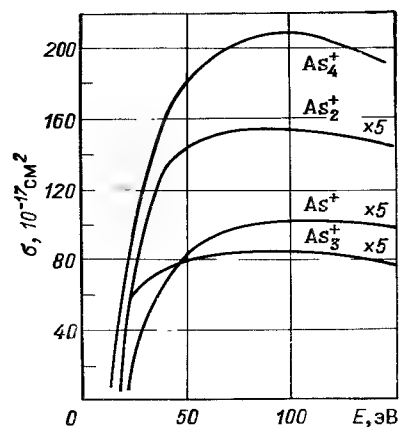


Рис. 19.34. Сечение ионизации  $As_4$  [49]

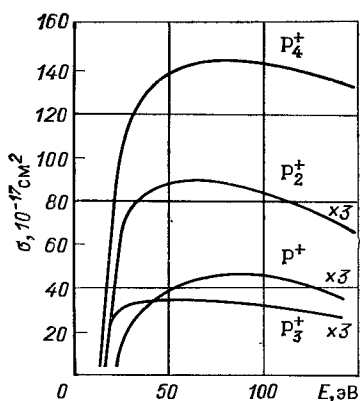


Рис. 19.32. Сечение ионизации  $P_4$  [49]

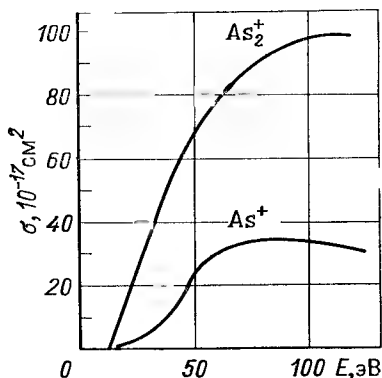


Рис. 19.33. Сечение ионизации  $As_2$  [49]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Edlén B. Atomic spectra//Spectroscopy I/Ed. by S. Flügge. Encyclopedia of Physics. Berlin: Springer. 1964. Vol. 27. P. 79—220.
2. Moore C. E. Ionization potentials and ionization limits derived from optical spectra/Nat. Stand. Ref. Data Ser. Nat. Bur. Stand. Vol. 34. Washington: NBS, 1970.
3. Martin W. C., Zalubas R., Hagan L. Atomic energy levels. The rare-earth elements/Nat. Stand. Ref. Data Ser. Nat. Bur. Stand. Vol. 60. Washington: NBS, 1978.
4. Worden E. F., Conway J. G. Multistep laser photoionization of the lanthanides and actinides//Lanthanide and Actinide Chemistry and Spectroscopy. Amer. Chem. Soc. Symp. Series 131/Ed. by N. M. Edelstein. Washington: Amer. Chem. Soc. 1980. Chap. 19. P. 381—425.
5. Kelly R. L. Atomic and ionic spectrum lines below 2000 Å (H through Ar)/Preprint ORNL-5922. Oak Ridge, Tennessee, Oct. 1982.
6. Раддиг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоатомиздат. 1986.
7. Хьюбер К. П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул: Пер. с англ./Под ред. Н. Н. Соболева. М.: Мир. 1984.
8. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону/Л. В. Гурвич, Г. В. Карачевцев, В. Н. Кондратьев и др.; Под ред. В. И. Кондратьева. М.: Наука, 1974.
9. Карлсон Т. А. Фотоэлектронная и оже-спектроскопия: Пер. с англ. Л.: Машиностроение. 1981. Приложение I.
10. Shirley D. A., Martin R. L., Kowalczyk S. P. e. a.//Phys. Rev. 1977. Vol. B15. P. 544—552.
11. Mehlhorn W., Breuckmann B., Hausmann D.//Phys. Scripta. 1977. Vol. 16. P. 177—185.
12. Porter F. T., Freedman M. S.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1978. Vol. 7. P. 1267.
13. Sevier K. D.//Atom. Data Nucl. Data Tabl. 1979. Vol. 24. P. 323—371.
14. Fuggle J. C., Martensson N.//J. Electron Spectr. Relat. Phenomena. 1980. Vol. 21. P. 275.
15. Siegbahn H., Karlsson L. Photoelectron spectroscopy//Encyclopedia of Physics. Vol. 31/Ed. by W. Mehlhorn. Berlin: Springer. 1982. P. 215—467.
16. Jolly W. L., Bomben K. D., Eyermann C. J.//Atom. Data Nucl. Data Tabl. 1984. Vol. 31. P. 433—493.
17. Мессе Г. Отрицательные ионы: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.

18. Смирнов Б. М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978.
19. Hotop H., Lineberger W. C.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. Vol. 4. P. 539—576; 1985. Vol. 14. P. 731—750.
20. Mead R. D., Stevens A. E., Lineberger W. C. Photodetachment in negative ion beams//Gas Phase Ion Chemistry/Ed. by M. T. Bowers. N. Y.: Academic, 1984. Vol. 3. Chap. 22.
21. Drzaic P. S., Marks J., Brauman J. I. Electron photodetachment from gas phase molecular anions//Ibid. Chap. 21.
22. Christodoulides A. A., McCorkle D. L., Christophorou L. G. Electron affinities of atoms, molecules, and radicals//Electron—Molecule Interactions and Their Applications/Ed. by L. G. Christophorou. N. Y., Lond.: Academic, 1984. Vol. 2. P. 423—641.
23. Walder R., Franklin J. L.//Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 1980. Vol. 36. P. 85.
24. Lias S. G., Liebman J. F., Levin R. D.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. Vol. 13. P. 695.
25. Raksit A. B., Bohme D. K.//Intern. J. Mass Spectrom. Ion Proc. 1984. Vol. 57. P. 211.
26. Bethe H. A.//Ann. Phys. 1930. Vol. 5. P. 325.
27. Lotz W.//Z. Phys. 1967. Vol. 206. P. 205—211.
28. Lotz W.//Ibid. 1970. Vol. 232. P. 101—107.
29. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука. 1973.
30. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука. 1979.
31. Bell K. L., Gilbody H. B., Hughes J. G. e. a.//J. Phys. Chem. Ref. Dat. 1983. Vol. 12. P. 891—916.
32. Rapp D., Englander—Golden P.//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 1464—1479.
33. Schram B. L., De Heer F. J., Van der Wiel M. J., Kistemaker J.//Physica. 1965. Vol. 31. P. 94—112.
34. Dixon A. J., Harrison M. F., Smith A. C. H.//J. Phys. B: Atom. and Molec. Phys. 1976. Vol. 15. P. 2617—2631.
35. Stephan K., Helm H., Märk T. D. J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73. P. 3763—3778.
36. Brook E., Harrison M. F. A., Smith A. C. H.//J. Phys. B: Atom. and Molecular. Phys. 1978. Vol. 11. P. 3115—3123.
37. Ziegler D. I., Newman J. H., Smith K. A., Stebbings R. F.//Plant. and Space Sci. 1982. Vol. 30. P. 451—456.
38. Ziegler D. L., Newman J. H., Goeller L. N. e. a.//Ibid. P. 1269—1274.
39. Запесочный И. И., Алексахин И. С. Ионизация атомов щелочных металлов медленными электронами//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1968. Т. 55. С. 76—85.
40. Nygaard K. J., Hahn Yu. B.//J. Chem. Phys. 1973. Vol. 58. P. 3494—3499.
41. Nygaard K. J.//Ibid. 1968. Vol. 49. P. 1995—2002.
42. Вайнштейн Л. А., Очкур В. И., Раховский В. И., Степанов А. М.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1971. Т. 61. С. 511—519.
43. Kieffer L. J., Dunn G. H.//Rev. Mod. Phys. 1966. Vol. 38. P. 1—35.
44. Lotz W.//Astrophys. J. Suppl. 1967. Vol. 14. P. 207—219.
45. Павлов С. И., Раховский В. И., Федорова Г. М. Журн. эксперим. и теорет. физ. 1967. Т. 52. С. 21—28.
46. Головач Д. Г., Раховский В. И., Шустряков В. М. //Измерительная техника. 1986. № 2. С. 52—53.
47. Halle J. C., Lo H. N., Fite W. L.//Phys. Rev. 1981. Vol. 23A. P. 1708—1716.
48. Orient O. J., Srivastava S. K.//J. Chem. Phys. 1984. Vol. 80. P. 140—143.
49. Monnom G., Gancherel Ph., Paparoditis C.//J. Phys. 1984. Vol. 45. P. 77—84.

## ГЛАВА 20

### ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

А. В. Елецкий

#### 20.1. ДИФфуЗИЯ И ПОДВИЖНОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

В идеальной слабоионизованной плазме, где степень ионизации удовлетворяет условию  $N_e/N_a \ll (kT_e/Ry)^2$  ( $N_e$ ,  $N_a$  — плотность электронов и нейтральных частиц соответственно;  $T_e$  — температура электронов;  $Ry = 13,6$  эВ — атомный масштаб энергии), диффузия заряженных частиц (электронов и ионов) определяется в основном парными соударениями этих частиц с нейтральными частицами (атомами и молекулами). При этом плотность нейтральных и заряженных частиц должна удовлетворять критериям идеальности

$$N_a \ll 1/a_0^3, \quad (20.1)$$

$$N_e \ll (kT_e)^{3/2}/e^6, \quad (20.2)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $a_0$  — размер атома. При малых значениях напряженности электрического поля, когда средние энергии заряженных и нейтральных частиц различаются несущественно, коэффициент диффузии заряженных частиц  $D$  связан с их

подвижностью  $K$  соотношением Эйнштейна

$$D = \frac{kT}{e} K. \quad (20.3)$$

Подвижность заряженных частиц  $K$  определяется соотношением  $K = w/E$ , где  $w$  — дрейфовая скорость заряженных частиц в электрическом поле напряженностью  $E$ . При высокой напряженности электрического поля  $E$ , когда функция распределения заряженных частиц отличается от максвелловской и их «температура» не имеет прямого физического смысла, соотношение (20.3) справедливо приближенно, с погрешностью 10—15%, если при этом под «температурой» заряженных частиц понимать величину, связанную с их средней энергией  $\bar{\epsilon}$  соотношением  $\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT$ . В плазме, основной механизм проводимости которой связан с движением электронов под действием электрического поля, подвижность электронов  $K_e$  связана с проводимостью плазмы  $\sigma$  соотношением

$$K_e = \sigma/eN_e. \quad (20.4)$$

Соотношения (20.3), (20.4) позволяют определить коэффициент диффузии электронов на основании данных по электропроводности слабоионизованной плазмы.

Если характерный размер, на котором заметно изме-

Таблица 20.1. Дрейфовая скорость  $w_e$ ,  $10^5$  см/с, и отношение  $eD_{\perp}/K$ , эВ, для электронов в газе [1]

| $E/N$ ,<br>$10^{-17}$ В·см <sup>2</sup> | He    |                | Ne    |                | Ar    |                | Kr    |                | Xe    |                |
|-----------------------------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
|                                         | $w_e$ | $eD_{\perp}/K$ | $w_e$ | $eD_{\perp}/K$ | $w_e$ | $eD_{\perp}/K$ | $w_e$ | $eD_{\perp}/K$ | $w_e$ | $eD_{\perp}/K$ |
| 0,03                                    | 0,7   | 0,034          | 1,3   | —              | 1,2   | 0,94           | 1     | —              | 0,16  | —              |
| 0,05                                    | 1     | 0,042          | 1,6   | —              | 1,4   | 1,2            | 1,2   | —              | 0,5   | —              |
| 0,07                                    | 1,3   | 0,051          | 1,8   | —              | 1,5   | 1,3            | 1,2   | —              | 0,74  | —              |
| 0,1                                     | 1,6   | 0,065          | 2,1   | 0,4            | 1,6   | 1,5            | 1,3   | —              | 0,88  | —              |
| 0,3                                     | 2,8   | 0,15           | 3,4   | 0,91           | 2,2   | 2,3            | 1,6   | —              | 1,1   | —              |
| 0,5                                     | 3,7   | 0,24           | 4,3   | 1,4            | 2,5   | 2,8            | 1,7   | —              | 1,2   | —              |
| 0,7                                     | 4,3   | 0,32           | 5     | 1,8            | 2,7   | 3,2            | 1,9   | —              | 1,3   | —              |
| 1                                       | 5,1   | 0,43           | 5,8   | 2,5            | 3     | 3,8            | 2     | —              | 1,4   | —              |
| 3                                       | 8,8   | 1,2            | 15    | 5,2            | 4     | 7,2            | 3,2   | —              | 1,8   | —              |
| 5                                       | 12    | 2,3            | 19    | 6              | 4,9   | 8,2            | —     | —              | —     | —              |
| 7                                       | 16    | 3              | 26    | 6,4            | 7,2   | 8,2            | —     | —              | —     | —              |
| 10                                      | 25    | 3,6            | 38    | 6,9            | 11    | 7,7            | —     | —              | —     | —              |
| 30                                      | 68    | 5,3            | 100   | —              | 26    | 7,7            | —     | —              | —     | —              |
| 50                                      | 130   | 6,6            | 150   | —              | 42    | 7,1            | —     | —              | —     | —              |
| 70                                      | 190   | 7,3            | 200   | —              | 55    | 6,4            | —     | —              | —     | —              |
| 100                                     | 280   | 8,2            | 260   | —              | 74    | 6,4            | —     | —              | 65    | —              |
| 200                                     | 580   | 11             | 460   | —              | 120   | 6,2            | —     | —              | 130   | —              |
| 300                                     | 880   | 14             | 640   | —              | —     | 5,8            | —     | —              | 180   | —              |
| 500                                     | 1400  | 16             | —     | —              | —     | 6,6            | —     | —              | 250   | —              |
| 800                                     | 1700  | 18             | —     | —              | —     | 7,8            | —     | —              | —     | —              |
| 1000                                    | —     | —              | —     | —              | —     | 8,5            | —     | —              | —     | —              |

| $E/N$ ,<br>$10^{-17}$ В·см <sup>2</sup> | H <sub>2</sub> |       | D <sub>2</sub> |       | N <sub>2</sub> |       | O <sub>2</sub> |      | CO <sub>2</sub> |       |
|-----------------------------------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|------|-----------------|-------|
| 0,03                                    | 0,46           | 0,027 | 0,46           | 0,026 | 1,1            | 0,028 | 2,6            | —    | 0,054           | —     |
| 0,05                                    | 0,74           | 0,028 | 0,74           | 0,027 | 1,6            | 0,031 | 3,7            | —    | 0,095           | —     |
| 0,07                                    | 1              | 0,029 | 1              | 0,029 | 2              | 0,035 | 4,1            | —    | 0,14            | 0,026 |
| 0,1                                     | 1,4            | 0,032 | 1,4            | 0,031 | 2,4            | 0,042 | 4,3            | —    | 0,19            | 0,026 |
| 0,3                                     | 3,1            | 0,046 | 3              | 0,048 | 3,1            | 0,1   | 5,4            | —    | 0,54            | 0,026 |
| 0,5                                     | 4,3            | 0,059 | 4              | 0,067 | 3,5            | 0,16  | 7,3            | —    | 0,89            | 0,026 |
| 0,7                                     | 5,2            | 0,074 | 4,7            | 0,088 | 3,9            | 0,20  | 9,2            | —    | 1,2             | 0,026 |
| 1                                       | 6,2            | 0,095 | 5,4            | 0,12  | 4,4            | 0,28  | 10             | 0,14 | 1,8             | 0,026 |
| 3                                       | 9,8            | 0,23  | 8,9            | 0,28  | 7,5            | 0,61  | 22             | 0,3  | 5,4             | 0,03  |
| 5                                       | 13             | 0,33  | 11             | 0,39  | 11             | 0,74  | 26             | 0,49 | 9,1             | 0,035 |
| 7                                       | 15             | 0,41  | 14             | —     | 14             | 0,84  | 28             | 0,73 | 13              | 0,043 |
| 10                                      | 19             | 0,51  | 17             | —     | 18             | 0,93  | 31             | 1,1  | 21              | 0,065 |
| 30                                      | 37             | 1     | —              | —     | 42             | 1,2   | 72             | 2,4  | 120             | 0,99  |
| 50                                      | 57             | 1,7   | —              | —     | 61             | 1,4   | 110            | 2,9  | 130             | 1,7   |
| 70                                      | 83             | 2,2   | —              | —     | 79             | 1,5   | 120            | 3,0  | 130             | 2,4   |
| 100                                     | 130            | 2,7   | —              | —     | 100            | 1,9   | 160            | 3,4  | 130             | 3,2   |
| 200                                     | 340            | 3,8   | —              | —     | 200            | 3,4   | 260            | —    | 180             | 4,4   |
| 300                                     | 470            | 4,5   | —              | —     | 290            | 4,2   | 330            | —    | 240             | 5,0   |
| 500                                     | 730            | 5,4   | —              | —     | 420            | —     | 450            | —    | 320             | 6,5   |
| 800                                     | 960            | 6,5   | —              | —     | 530            | —     | 640            | —    | 420             | 7,1   |
| 1000                                    | 1200           | 7,1   | —              | —     | 590            | —     | 710            | —    | 490             | 7,9   |

| $E/N$ ,<br>$10^{-17}$ В·см <sup>2</sup> | CO  |       | NO  |      | H <sub>2</sub> O (пар) |   | CH <sub>4</sub> |   | CF <sub>4</sub> [2] |   | SF <sub>6</sub> [2] |   |
|-----------------------------------------|-----|-------|-----|------|------------------------|---|-----------------|---|---------------------|---|---------------------|---|
| 0,3                                     | 7,4 | 0,045 | 7,8 | —    | —                      | — | —               | — | 30                  | — | —                   | — |
| 0,5                                     | 7,7 | 0,063 | 8,6 | —    | —                      | — | —               | — | 45                  | — | —                   | — |
| 0,7                                     | 9   | 0,08  | 9,1 | —    | —                      | — | —               | — | 57                  | — | —                   | — |
| 1                                       | 10  | 0,09  | 12  | —    | —                      | — | —               | — | 68                  | — | —                   | — |
| 3                                       | 18  | 0,18  | 26  | 0,2  | 0,7                    | — | 100             | — | 100                 | — | —                   | — |
| 5                                       | 22  | 0,25  | 32  | 0,23 | 1,2                    | — | 110             | — | 115                 | — | —                   | — |
| 7                                       | 25  | 0,32  | 38  | 0,25 | 1,6                    | — | 95              | — | 130                 | — | —                   | — |

| $E/N$ ,<br>$10^{-17}$ В·см <sup>2</sup> | CO  |      | NO |      | H <sub>2</sub> O (пар) |       | CH <sub>4</sub> |     | CF <sub>4</sub> [2] |     | SF <sub>6</sub> [2] |     |
|-----------------------------------------|-----|------|----|------|------------------------|-------|-----------------|-----|---------------------|-----|---------------------|-----|
| 10                                      | 26  | 0,42 | 47 | 0,28 | 2,3                    | —     | 85              | —   | 150                 | 0,1 | 43                  | —   |
| 30                                      | 39  | 0,82 | 66 | 0,63 | 7,5                    | —     | 75              | —   | —                   | 0,6 | 53                  | —   |
| 50                                      | 52  | 1,1  | 84 | 1,1  | 27                     | —     | —               | —   | —                   | 1,7 | 77                  | —   |
| 70                                      | 66  | 1,3  | —  | —    | 58                     | 0,022 | —               | —   | —                   | 3,0 | 86                  | —   |
| 90                                      | 85  | 1,4  | —  | —    | 110                    | 0,029 | —               | —   | 150                 | 3,7 | 97                  | —   |
| 100                                     | 96  | 1,6  | —  | —    | —                      | —     | 74              | 4,9 | 170                 | 4   | 100                 | —   |
| 200                                     | 230 | 2,8  | —  | —    | —                      | —     | 150             | 5,2 | 220                 | 5,0 | 160                 | —   |
| 300                                     | 290 | 3,7  | —  | —    | —                      | —     | 190             | 5,1 | 300                 | 5,5 | 190                 | 5,1 |
| 300                                     | 430 | 5,1  | —  | —    | —                      | —     | 280             | 5,3 | —                   | —   | 260                 | 5,5 |
| 800                                     | —   | —    | —  | —    | —                      | —     | 400             | 6,6 | —                   | —   | 340                 | 6,8 |
| 1000                                    | —   | —    | —  | —    | —                      | —     | 470             | 7,8 | —                   | —   | 360                 | —   |

Продолжение табл. 20.1

| $E/N$ ,<br>$10^{-17}$ В·см <sup>2</sup> [2] | I <sub>2</sub> |      | N <sub>2</sub> O |      | C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> |     | C <sub>4</sub> F <sub>10</sub> |      | CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> |     | Cl <sub>2</sub> |     | Br <sub>2</sub> |     | NH <sub>3</sub> | HCl |
|---------------------------------------------|----------------|------|------------------|------|-------------------------------|-----|--------------------------------|------|---------------------------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|
| 0,1                                         | —              | —    | 0,7              | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | —               | —   |
| 0,2                                         | —              | —    | 1,3              | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | —               | —   |
| 0,4                                         | —              | —    | 2,8              | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 0,17            | —   |
| 0,6                                         | —              | —    | 4                | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 0,27            | —   |
| 0,8                                         | —              | —    | 6                | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 0,36            | —   |
| 1                                           | —              | —    | 7,8              | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 0,45            | —   |
| 2                                           | —              | —    | 18               | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 0,85            | —   |
| 4                                           | —              | —    | 37               | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 1,8             | —   |
| 6                                           | —              | —    | 53               | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 2,7             | —   |
| 8                                           | —              | —    | 65               | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 3,4             | 3   |
| 10                                          | —              | —    | 80               | 0,35 | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 4,4             | 4   |
| 20                                          | —              | —    | —                | 0,51 | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | 10              | 9   |
| 40                                          | —              | 0,75 | —                | 1,2  | —                             | —   | —                              | —    | —                               | 95  | 1,8             | 63  | 2,6             | 50  | 27              | —   |
| 60                                          | —              | 1,9  | —                | 1,9  | —                             | —   | —                              | —    | —                               | 94  | 2,3             | 74  | 2,8             | 110 | 61              | —   |
| 80                                          | 80             | 3,1  | —                | 2,45 | —                             | —   | —                              | —    | —                               | 92  | 2,6             | 80  | 3,0             | —   | 88              | —   |
| 100                                         | 82             | 3,3  | —                | 3,1  | —                             | —   | —                              | —    | —                               | 94  | 2,8             | 82  | 3,1             | —   | 100             | —   |
| 200                                         | —              | —    | —                | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | 115 | 3,2             | 103 | 3,1             | —   | 130             | —   |
| 300                                         | —              | —    | —                | —    | 160                           | 3,1 | 140                            | 2,85 | —                               | 3,7 | —               | —   | —               | —   | —               | —   |
| 400                                         | —              | —    | —                | —    | 190                           | 3,8 | 150                            | 3,4  | 190                             | 3,7 | —               | —   | —               | —   | —               | —   |
| 500                                         | —              | —    | —                | —    | 220                           | 4,3 | 170                            | 3,9  | 220                             | 3,8 | —               | —   | —               | —   | —               | —   |
| 600                                         | —              | —    | —                | —    | 240                           | 4,6 | 200                            | —    | 250                             | 3,9 | —               | —   | —               | —   | —               | —   |
| 800                                         | —              | —    | —                | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | 4,1 | —               | —   | —               | —   | —               | —   |
| 1000                                        | —              | —    | —                | —    | —                             | —   | —                              | —    | —                               | —   | —               | —   | —               | —   | —               | —   |

няется плотность заряженных частиц в плазме. много больше радиуса Дебая

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{8\pi N_e e^2}},$$

плазма является квазинейтральной, т. е. плотности положительных и отрицательных зарядов равны. При этом имеет место совместная диффузия заряженных частиц разного знака (амбиполярная диффузия) с коэффициентом диффузии  $D_a$ , единым для электронов и ионов и выражающимся через коэффициент диффузии ионов в этом же газе  $D_i$ :

$$D_a = D_i (1 + T_e/T_i), \quad (20.5)$$

где  $T_i$  и  $T_e$  — температура ионов и электронов соответственно. Соотношение (20.5) выполняется с той же точностью, что и соотношение Эйнштейна (20.3).

Основными характеристиками движения электронов в газе под действием электрического поля являются коэффициент поперечной диффузии  $D_{\perp}$  и дрейфовая скорость электронов  $w_e$ . Однако поскольку коэффициент поперечной диффузии электронов в газе является функцией плотности частиц газа, в качестве справочных обычно используют значения  $w_e$  и характеристической энергии электронов  $\bar{\epsilon}_e$ , определяемой как отношение  $D_{\perp}$  к подвижности электронов  $K_e$ . Оба эти параметра являются однозначными функциями отношения напряженности электрического поля  $E$  к плотности частиц газа  $N_a$ . В табл. 20.1 приведены измеренные значения  $\bar{\epsilon}_e$  и  $w_e$  для некоторых газов при различных значениях отношения  $E/N_a$ . В табл. 20.2 представлены значения коэффициента диффузии ионов  $D_i$  при атмосферном давлении и нулевом электрическом поле.

Таблица 20.2. Коэффициент диффузии ионов  $D_i$ , см<sup>2</sup>/с, в различных газах при нулевом электрическом поле и атмосферном давлении [3—7].  
(В случаях, когда температура газа отлична от 300 К, ее значение указано в скобках)

| Ион                          | He   | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rb              | Cs     | Hg             | H <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | NO    | CO    | SF <sub>6</sub> | Cl <sub>2</sub> | Br <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-----------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| He <sup>+</sup>              | 0,27 | 0,44  | —     | 0,116 | —     | —               | —      | —              | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | —               | —               | —               | —               |
| He <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,43 | 0,24  | 0,098 | 0,076 | 0,059 | —               | —      | —              | 0,28           | —              | 0,098          | 0,103          | —     | 0,094 | —               | —               | —               | —               | 0,078           |
| Ne <sup>+</sup>              | 0,79 | 0,107 | 0,069 | 0,052 | 0,039 | —               | —      | —              | 0,27           | —              | 0,073          | 0,074          | —     | 0,070 | —               | —               | —               | —               | 0,054           |
| HeNe <sup>+</sup>            | 0,66 | 0,17  | —     | —     | —     | —               | —      | —              | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | —               | —               | —               | —               |
| Ne <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,45 | 0,16  | 0,056 | 0,040 | 0,030 | —               | —      | —              | 0,26           | —              | 0,061          | 0,062          | —     | 0,058 | —               | —               | —               | —               | 0,044           |
| Ar <sup>+</sup>              | 0,50 | 0,14  | 0,039 | 0,040 | 0,030 | —               | —      | —              | 0,26           | 0,21           | 0,061          | 0,062          | —     | 0,058 | —               | 0,033           | —               | —               | 0,044           |
| Kr <sup>+</sup>              | 0,52 | 0,12  | 0,056 | 0,024 | 0,022 | —               | —      | —              | 0,26           | 0,20           | 0,053          | 0,054          | 0,060 | 0,05  | —               | 0,027           | —               | —               | 0,037           |
| Xe <sup>+</sup>              | 0,46 | 0,12  | 0,045 | 0,029 | 0,015 | —               | —      | —              | 0,28           | 0,20           | 0,046          | 0,103          | 0,057 | 0,094 | —               | 0,024           | 0,016           | 0,059           | 0,035           |
| H <sup>+</sup>               | 0,82 | 0,63  | —     | 0,23  | —     | —               | —      | —              | 0,40           | 0,45           | 0,098          | 0,2            | 0,28  | 0,29  | —               | 0,17            | —               | —               | 0,22            |
| D <sup>+</sup>               | 0,64 | 0,42  | —     | 0,16  | —     | —               | —      | —              | —              | 0,29           | 0,20           | —              | 0,19  | 0,20  | —               | 0,12            | —               | —               | 0,16            |
| Hg <sup>+</sup>              | 0,51 | 0,154 | 0,056 | 0,030 | —     | —               | —      | 0,066<br>(350) | —              | 0,20           | 0,055          | 0,54           | 0,055 | 0,063 | —               | 0,023           | 0,015           | 0,058           | 0,037           |
| N <sup>+</sup>               | 0,52 | 0,197 | —     | 0,066 | —     | —               | —      | —              | —              | 0,23           | 0,078          | —              | 0,16  | 0,17  | —               | 0,049           | —               | —               | —               |
| N <sub>2</sub> <sup>+</sup>  | 0,49 | 0,22  | 0,059 | 0,047 | 0,034 | —               | —      | —              | 0,26           | 0,21           | —              | 0,067          | 0,15  | 0,063 | —               | 0,037           | —               | —               | —               |
| O <sup>+</sup>               | 0,54 | 0,19  | 0,089 | 0,062 | —     | —               | —      | —              | —              | 0,22           | 0,085          | —              | 0,15  | 0,16  | —               | 0,046           | —               | —               | 0,049           |
| H <sub>2</sub> <sup>+</sup>  | 0,64 | 0,42  | —     | 0,16  | —     | —               | —      | —              | —              | —              | 0,20           | —              | 0,20  | 0,21  | —               | 0,12            | —               | —               | —               |
| Kr <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —    | 0,14  | —     | 0,028 | 0,021 | —               | —      | —              | 0,29           | 0,20           | —              | —              | 0,056 | 0,052 | —               | 0,024           | 0,016           | —               | —               |
| Xe <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,36 | 0,12  | 0,043 | 0,026 | 0,019 | —               | —      | —              | 0,25           | 0,20           | 0,049          | 0,048          | 0,054 | 0,046 | —               | 0,022           | 0,014           | —               | 0,033           |
| Rb <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —    | 0,13  | —     | 0,030 | 0,021 | 0,016<br>(621)  | 0,0055 | 0,017          | 0,29           | 0,21           | —              | —              | 0,056 | 0,056 | —               | 0,023           | 0,015           | —               | —               |
| Cs <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —    | 0,13  | —     | 0,028 | 0,019 | 0,0066<br>(625) | 0,011  | 0,015          | 0,29           | 0,20           | —              | —              | 0,054 | 0,051 | —               | 0,022           | 0,014           | —               | —               |
| Hg <sub>2</sub> <sup>+</sup> | —    | 0,13  | —     | 0,027 | 0,018 | 0,0063<br>(500) | 0,0047 | 0,019<br>(500) | 0,29           | 0,20           | —              | —              | 0,054 | 0,050 | —               | 0,021           | 0,013           | —               | —               |
| H <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | 0,78 | 0,35  | —     | 0,13  | 0,104 | —               | —      | —              | 0,39           | 0,30           | —              | —              | 0,17  | 0,16  | —               | 0,098           | 0,082           | —               | —               |
| D <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | —    | 0,26  | —     | 0,096 | 0,074 | —               | —      | —              | 0,33           | 0,21           | —              | —              | 0,12  | 0,14  | —               | 0,071           | 0,058           | —               | —               |
| N <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | —    | 0,15  | —     | 0,043 | 0,032 | —               | —      | —              | 0,30           | 0,21           | —              | —              | 0,068 | 0,062 | —               | 0,032           | 0,024           | —               | —               |
| N <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | —    | 0,15  | —     | 0,039 | 0,028 | —               | —      | —              | 0,29           | 0,21           | 0,058          | —              | 0,063 | 0,059 | —               | 0,030           | 0,022           | —               | —               |
| Ba <sup>+</sup>              | —    | 0,14  | —     | 0,031 | 0,022 | —               | —      | —              | 0,018          | 0,20           | 0,06           | —              | 0,057 | 0,053 | —               | 0,024           | 0,016           | —               | —               |
| O <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | —    | 0,14  | —     | 0,038 | 0,027 | —               | —      | —              | —              | 0,29           | 0,21           | 0,053          | 0,049 | 0,062 | —               | 0,029           | 0,021           | —               | —               |
| H <sup>-</sup>               | 1,02 | 0,58  | —     | 0,23  | 0,18  | 0,053           | 0,047  | 0,16           | 0,50           | 0,45           | —              | —              | 0,056 | 0,28  | —               | 0,17            | —               | —               | 0,05            |
| O <sup>-</sup>               | 0,75 | 0,19  | —     | 0,062 | 0,047 | 0,014           | 0,0125 | 0,041          | 0,30           | 0,22           | —              | —              | 0,83  | 0,086 | —               | 0,046           | —               | —               | —               |
| O <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0,56 | 0,16  | —     | 0,047 | 0,035 | 0,011           | 0,0093 | 0,030          | 0,33           | 0,22           | —              | —              | 0,056 | 0,071 | —               | 0,035           | —               | —               | —               |
| O <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0,48 | 0,15  | 0,63  | 0,041 | 0,030 | 0,0095          | 0,0080 | 0,026          | 0,29           | 0,21           | —              | —              | 0,066 | 0,065 | —               | 0,031           | —               | —               | —               |
| O <sub>4</sub> <sup>-</sup>  | —    | 0,14  | —     | 0,038 | 0,027 | 0,0087          | 0,0072 | 0,023          | 0,29           | 0,20           | —              | —              | 0,056 | 0,062 | —               | 0,029           | —               | —               | 0,033           |
| CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | —    | 0,15  | 0,62  | 0,038 | 0,028 | 0,0089          | 0,0074 | 0,023          | 0,29           | 0,20           | —              | —              | 0,065 | 0,063 | —               | 0,029           | —               | —               | 0,032           |
| CO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | 0,43 | 0,14  | —     | 0,036 | 0,026 | 0,0083          | 0,0068 | 0,021          | 0,29           | 0,20           | —              | —              | 0,063 | 0,060 | —               | 0,027           | —               | —               | —               |
| O <sub>2</sub> <sup>+</sup>  | 0,55 | 0,21  | 0,067 | 0,015 | 0,032 | —               | —      | —              | 0,26           | —              | 0,063          | 0,058          | —     | 0,060 | —               | 0,035           | 0,027           | —               | 0,048           |
| Li <sup>+</sup>              | 0,63 | 0,25  | 0,12  | 0,096 | 0,072 | 0,021           | 0,018  | —              | 0,32           | 0,25           | 0,102          | 0,105          | —     | 0,098 | —               | 0,066           | 0,054           | —               | 0,082           |
| Na <sup>+</sup>              | 0,56 | 0,205 | 0,078 | 0,057 | 0,042 | 0,012           | 0,011  | —              | 0,32           | 0,23           | 0,073          | 0,071          | —     | 0,066 | —               | 0,04            | 0,031           | 0,067           | 0,057           |



| Ион                                          | He           | Ne    | Ar             | Kr    | Xe    | Rb              | Cs              | Иг | H <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | NO    | CO    | SF <sub>6</sub> | Cl <sub>2</sub> | Br <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |
|----------------------------------------------|--------------|-------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| K <sup>+</sup>                               | 0,53         | 0,187 | 0,069          | 0,048 | 0,034 | 0,010           | 0,0086          | —  | 0,33           | 0,24           | 0,065          | 0,069          | 0,058 | 0,059 | —               | 0,033           | 0,025           | 0,066           | 0,037           |
| Rb <sup>+</sup>                              | 0,52         | 0,169 | 0,058          | 0,038 | 0,026 | 0,0097<br>(621) | 0,0066          | —  | 0,33           | —              | 0,058          | 0,062          | —     | 0,05  | —               | 0,027           | 0,019           | —               | 0,032           |
| Cs <sup>+</sup>                              | 0,48         | 0,153 | 0,054          | 0,034 | 0,023 | 0,0073<br>(621) | 0,0065<br>(628) | —  | 0,33           | —              | 0,057          | 0,057          | —     | 0,052 | —               | 0,025           | 0,016           | —               | 0,029           |
| U <sup>+</sup>                               | 0,41         | —     | —              | —     | —     | 0,0067          | —               | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | 0,014           | —               | —               | —               | —               |
| SF <sub>6</sub> <sup>+</sup>                 | 0,24         | —     | —              | —     | —     | —               | 0,0057          | —  | —              | —              | —              | 0,052          | —     | —     | —               | —               | —               | 0,056           | —               |
| SF <sub>6</sub> <sup>-</sup>                 | 0,28         | —     | —              | —     | —     | —               | 0,0059          | —  | —              | —              | —              | 0,057          | —     | —     | 0,015           | —               | —               | 0,056           | —               |
| Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup>                 | 0,37         | 0,12  | 0,0475         | 0,031 | 0,023 | —               | —               | —  | 0,26           | —              | 0,054          | 0,054          | —     | 0,051 | —               | 0,027           | 0,019           | 0,061           | —               |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>                | 0,53         | 0,20  | 0,069          | —     | —     | —               | —               | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | 0,044           | 0,035           | 0,077           | —               |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>                | 0,55         | 0,18  | 0,087<br>(337) | —     | —     | —               | —               | —  | 0,33           | —              | 0,071          | —              | —     | —     | —               | 0,043           | 0,034           | 0,076           | —               |
| H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup>   | 0,45         | 0,16  | 0,073<br>(337) | —     | —     | —               | —               | —  | —              | —              | 0,079          | —              | —     | —     | —               | 0,038           | 0,026           | 0,067           | —               |
| H <sub>7</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup>   | 0,36         | 0,15  | 0,064<br>(337) | —     | —     | —               | —               | —  | —              | —              | 0,055          | —              | —     | —     | —               | 0,030           | 0,022           | 0,063           | —               |
| H <sub>9</sub> O <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | —            | 0,14  | 0,058<br>(337) | —     | —     | —               | 0,0076          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | 0,028           | 0,020           | 0,062           | —               |
| ReO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                | —            | 0,13  | 0,05           | —     | —     | —               | 0,0051          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | 0,028           | 0,014           | 0,058           | —               |
| ReO <sub>4</sub> <sup>-</sup>                | —            | 0,13  | 0,043          | —     | —     | —               | 0,0051          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | 0,024           | 0,014           | 0,058           | —               |
| WO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                 | —            | 0,13  | 0,051          | —     | —     | —               | 0,0054          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | 0,027           | 0,014           | 0,058           | —               |
| NO <sup>+</sup>                              | 0,54         | 0,15  | 0,061          | 0,046 | 0,033 | —               | —               | —  | 0,26           | —              | 0,065          | 0,067          | 0,049 | 0,062 | —               | —               | —               | —               | 0,048           |
| CO <sup>+</sup>                              | 0,51         | —     | 0,069          | 0,050 | 0,037 | —               | —               | —  | —              | —              | —              | —              | 0,046 | 0,045 | —               | —               | —               | —               | —               |
| N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup>   | —            | —     | 0,057          | 0,038 | 0,028 | —               | —               | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | —               | —               | —               | —               |
| C <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup>   | —            | —     | 0,062          | 0,039 | 0,028 | —               | —               | —  | —              | —              | —              | —              | —     | 0,046 | —               | —               | —               | —               | —               |
| C <sup>+</sup>                               | —            | —     | 0,092          | 0,070 | 0,054 | —               | —               | —  | —              | —              | —              | —              | —     | 0,070 | —               | —               | —               | —               | —               |
| (SF <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> <sup>-</sup> | —            | —     | 0,047          | 0,028 | 0,019 | —               | 0,0056          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | 0,012           | —               | —               | —               | —               |
| (SF <sub>6</sub> ) <sub>3</sub> <sup>-</sup> | —            | —     | 0,046          | 0,027 | 0,018 | —               | 0,0047          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | 0,011           | —               | —               | —               | —               |
| He <sub>3</sub> <sup>+</sup>                 | 0,12<br>(77) | —     | 0,092          | 0,039 | —     | —               | —               | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | —               | —               | —               | —               |
| Cl <sub>2</sub> <sup>-</sup>                 | —            | —     | 0,055          | 0,037 | 0,026 | —               | 0,0070          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | —               | —               | —               | —               |
| Br <sub>2</sub> <sup>-</sup>                 | —            | —     | 0,049          | 0,031 | 0,021 | —               | 0,0055          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | —               | —               | —               | —               |
| Br <sub>2</sub> <sup>-</sup>                 | 0,49         | —     | 0,058          | 0,035 | 0,025 | —               | 0,0067          | —  | —              | —              | —              | —              | —     | —     | —               | 0,083           | —               | —               | —               |

| Ион                           | He   | Ne   | Ar    | Kr    | Xe    | Rb | Cs | Hg | H <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | NO | CO | SF <sub>6</sub> | Cl <sub>2</sub> | Br <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |
|-------------------------------|------|------|-------|-------|-------|----|----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| N <sub>2</sub> O <sup>+</sup> | 0,47 | 0,18 | 0,056 | 0,044 | 0,032 | —  | —  | —  | —              | —              | 0,069          | —              | —  | —  | —               | —               | 0,050           | —               | —               |
| NO <sub>2</sub> <sup>+</sup>  | 0,47 | —    | 0,058 | 0,043 | 0,030 | —  | —  | —  | —              | —              | —              | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |
| SO <sub>2</sub> <sup>+</sup>  | 0,44 | —    | 0,049 | 0,038 | 0,027 | —  | —  | —  | —              | —              | —              | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |
| ArH <sup>+</sup>              | 0,50 | —    | 0,062 | 0,043 | 0,032 | —  | —  | —  | —              | —              | —              | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |
| COH <sup>+</sup>              | 0,52 | —    | 0,064 | 0,049 | 0,036 | —  | —  | —  | —              | —              | 0,069          | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |
| O <sub>2</sub> H <sup>+</sup> | 0,50 | —    | 0,066 | 0,047 | 0,035 | —  | —  | —  | —              | —              | —              | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |
| CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>  | 0,51 | 0,17 | 0,055 | 0,042 | 0,031 | —  | —  | —  | —              | —              | 0,056          | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |
| NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>  | 0,60 | —    | 0,81  | 0,060 | 0,046 | —  | —  | —  | —              | —              | —              | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0,57 | —    | 0,80  | 0,059 | —     | —  | —  | —  | —              | —              | —              | —              | —  | —  | —               | —               | —               | —               | —               |

| Ион                                            | He   | Ne   | Ar    | Kr    | Xe    | Rb     | Cs     | Hg    | H <sub>2</sub> | D <sub>2</sub> |
|------------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|----------------|----------------|
| N <sub>2</sub> OH <sup>+</sup>                 | 0,44 | 0,15 | 0,052 | —     | 0,031 | —      | —      | —     | —              | —              |
| O <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup>     | 0,47 | 0,16 | 0,065 | —     | 0,034 | —      | —      | —     | —              | —              |
| NO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> | 0,43 | 0,14 | 0,056 | —     | 0,027 | —      | —      | —     | —              | —              |
| CH <sub>5</sub> <sup>+</sup>                   | 0,55 | 0,19 | 0,081 | —     | 0,046 | —      | —      | —     | —              | —              |
| CH <sub>3</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup>    | 0,44 | 0,15 | 0,055 | —     | 0,030 | —      | —      | —     | —              | —              |
| Cl <sup>-</sup>                                | 0,52 | 0,21 | 0,073 | 0,048 | 0,035 | 0,011  | 0,0090 | 0,029 | 0,30           | 0,21           |
| OH <sup>-</sup>                                | 0,66 | 0,19 | —     | —     | 0,046 | 0,014  | 0,012  | 0,040 | 0,30           | 0,22           |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                   | 0,49 | 0,15 | —     | —     | 0,035 | 0,0095 | 0,081  | 0,026 | 0,29           | 0,21           |
| SO <sub>2</sub> F <sup>-</sup>                 | 0,39 | 0,14 | —     | —     | 0,025 | 0,0081 | 0,066  | 0,021 | 0,29           | 0,20           |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>-</sup>     | 0,45 | 0,17 | —     | —     | 0,038 | 0,012  | 0,010  | 0,031 | 0,30           | 0,21           |
| SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                   | 0,40 | 0,14 | —     | —     | 0,026 | 0,0082 | 0,0067 | 0,021 | 0,29           | 0,20           |
| HeH <sup>+</sup>                               | 0,61 | 0,28 | —     | —     | 0,081 | 0,024  | 0,022  | —     | 0,34           | 0,27           |
| F <sup>-</sup>                                 | 0,76 | 0,18 | 0,086 | 0,060 | 0,043 | 0,013  | 0,012  | 0,038 | 0,30           | 0,22           |
| I <sup>-</sup>                                 | 0,42 | 0,14 | 0,059 | —     | 0,022 | 0,0074 | 0,0059 | 0,018 | 0,29           | 0,20           |
| N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>                  | —    | 0,16 | —     | —     | 0,037 | 0,011  | —      | —     | 0,30           | 0,21           |

## 20.2. ВЯЗКОСТЬ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

Вязкость слабоионизованной плазмы, состоящей из нейтральных частиц, электронов и положительных ионов, может отличаться от вязкости нейтрального газа. При этом электроны, имеющие малую массу, практически ни при каких условиях не вносят заметного вклада в перенос импульса и их ролью в вязкости плазмы можно пренебречь. Вклад ионов в вязкость становится существенным уже при малой степени ионизации, поскольку сечение обмена импульсом, происходящего при столкновениях иона с атомом и обусловленного процессом резонансной перезарядки иона на атоме, существенно превышает сечение передачи импульса при соударениях атомов. Согласно элементарной кинетической теории зависимость вязкости плазмы  $\eta$  от ее параметров дается следующим выражением

$$\eta = \frac{\sqrt{TM}}{\sigma_{\text{упр}} + \sigma_{\text{рез}} N_i / N_a},$$

где  $T$  — температура плазмы;  $M$  — масса атома;  $\sigma_{\text{упр}}$  — сечение упругого рассеяния при столкновении атомов, приводящего к передаче импульса;  $\sigma_{\text{рез}}$  — сечение резонансной перезарядки иона на атоме;  $N_i$ ,  $N_a$  — плотность ионов и атомов соответственно. В равновесной плазме отношение  $N_i/N_a$  является функцией давления и температуры плазмы, что и определяет зависимость вязкости плазмы от ее параметров.

При малых степенях ионизации плазмы, когда вкладом ионов в вязкость можно пренебречь, вязкость плазмы растет с ростом температуры. Поскольку обычно  $\sigma_{\text{рез}} \gg \sigma_{\text{упр}}$ , при  $N_i/N_a \sim \sigma_{\text{упр}}/\sigma_{\text{рез}} \ll 1$  зависимость

Таблица 20.3. Максимальные значения вязкости плазмы инертного газа  $\eta_{\text{max}}$  и соответствующей температуры  $T_{\text{max}}$  [8, 9]

| Газ | $p$ , Па | $T_{\text{max}}$ , К | $N_i/N_a$ | $\eta_{\text{max}}$ , Па·с |
|-----|----------|----------------------|-----------|----------------------------|
| Ar  | $10^4$   | 7800                 | 0,069     | $3,0 \cdot 10^{-4}$        |
|     | $10^5$   | 8600                 | 0,058     | $3,4 \cdot 10^{-4}$        |
|     | $10^6$   | 10 200               | 0,048     | $3,9 \cdot 10^{-4}$        |
| Kr  | $10^6$   | 10 000               | 0,060     | $3,3 \cdot 10^{-4}$        |
| He  | $10^6$   | 9000                 | 0,067     | $3,4 \cdot 10^{-4}$        |

Таблица 20.4. Вязкость плазмы гелия и аргона при атмосферном давлении и различной температуре [8, 9],  $10^{-4}$  Па·с

| $T$ , $10^3$ К | 2    | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|----------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| He             | 0,72 | —   | 1,3 | 1,6 | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 2,9 | 2,9 | 3,2 | 3,3 |
| Ar             | 0,82 | 1,1 | 1,3 | 1,6 | 1,9 | 2,1 | 2,4 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | —   |

Таблица 20.5. Вязкость плазмы ксенона при различных давлениях и температуре [8, 9],  $10^{-4}$  Па·с

| $p$ , Па | Температура, К |      |      |      |      |
|----------|----------------|------|------|------|------|
|          | 6000           | 7000 | 8000 | 9000 | 1000 |
| $10^4$   | 2,6            | 2,9  | 3,0  | 2,7  | 1,7  |
| $10^5$   | 2,6            | 3,0  | 3,3  | 3,4  | 3,2  |
| $10^6$   | 2,6            | 3,0  | 3,3  | 3,6  | 3,9  |

вязкости от температуры имеет максимум. В табл. 20.3 приведены максимальные значения вязкости для равновесной плазмы инертных газов. В табл. 20.4—20.7, рис. 20.1 приводятся значения вязкости равновесной плазмы инертных газов, воздуха и Cs при различных давлениях и температуре [8—11]. Погрешность приводимых данных 10—30%.

Таблица 20.6. Вязкость плазмы воздуха при атмосферном давлении и различной температуре [10]

| $T$ , $10^3$ К          | 2   | 4   | 6   | 8   | 10  | 12  | 14  | 16  | 18  | 20  |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\eta$ , $10^{-4}$ Па·с | 0,7 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 2,8 | 2,1 | 1,2 | 0,6 | 0,3 | 0,1 |

Таблица 20.7. Вязкость частично ионизованного пара Cs при различных давлениях и температуре [11]

| $T$ , $10^3$ К | Давление, Па |      |        |        |        |        |        |
|----------------|--------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | 1            | 10   | $10^2$ | $10^3$ | $10^4$ | $10^5$ | $10^6$ |
| 2              | 317          | 386  | 406    | 413    | 412    | 412    | 418    |
| 3              | 6,85         | 3,88 | 398    | 480    | 561    | 583    | 592    |
| 4              | 3,34         | 6,64 | 19,6   | 49,5   | 224    | 488    | 663    |
| 5              | 5,58         | 7,93 | 11,7   | 18,8   | 66,8   | 226    | 482    |
| 7              | 11,6         | 15,0 | 19,4   | 25,4   | 37,7   | 80,5   | 221    |
| 10             | 26,0         | 31,4 | 38,2   | 48,1   | 63,2   | 91,0   | 188    |

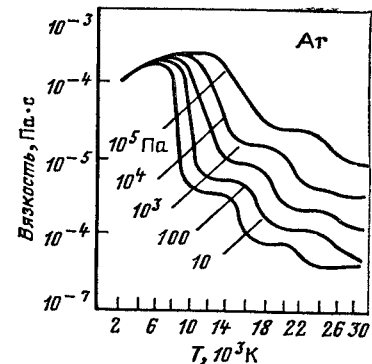


Рис. 20.1. Вязкость равновесной частично ионизованной плазмы аргона при различных давлениях и температуре

## 20.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

Перенос тепла в ионизованном газе осуществляется как за счет нейтральных, так и заряженных частиц. При этом в слабоионизованном газе вклад положительных ионов в теплопроводность относительно невелик, поскольку значения энергии, переносимой ионом и нейтральным атомом, сопоставимы, а доля ионов относительно мала. Электроны, скорость которых значительно превышает скорость тяжелых частиц, вносят заметный вклад в теплопроводность плазмы уже при малых степенях ионизации  $N_e/N_a \gg \sqrt{m/M}$  ( $m$  — масса электрона;  $M$  — масса атома, иона). При этом, поскольку обмен энергией электронов с атомами мал ( $\sim m/M$ ), вклады в теплопроводность нейтральных частиц и электронов аддитивны. Наряду с этим определенный вклад в теплопроводность равновесного ионизованного газа вносит процесс установления ионизационного равновесия  $A \rightleftharpoons A^+ + e$ .

Атомы переходят в область с более высокой температурой и там ионизируются, перенося таким образом энергию, равную потенциалу ионизации. Наоборот, заряженные частицы, переходя из более нагретой области в менее нагретую, рекомбинируют там, также перенося такую же энергию в том же направлении. Таким образом, коэффициент теплопроводности слабоионизованной равновесной плазмы  $\kappa$  представляется в виде

$$\kappa = \kappa_a + \kappa_e + \kappa_{int},$$

где  $\kappa_a$ ,  $\kappa_e$ ,  $\kappa_{int}$  — вклады в теплопроводность, обусловленные нейтральными частицами, электронами и переносом энергии ионизации соответственно. Вклад последнего слагаемого в теплопроводность максимален при  $N_e/N_a \sim \sim \tau m/M$  и в этих условиях достигает 30%. Поскольку равновесная степень ионизации газа зависит не только от температуры, но и от давления, теплопроводность ионизованного газа также существенно зависит от этих двух параметров. Погрешность приводимых в табл. 20.8 данных составляет  $\sim 10\%$ . В табл. 2.9 представлены данные о теплопроводности плазмы воздуха.

Таблица 20.8. Теплопроводность плазмы инертных газов при атмосферном давлении и различной температуре,  $10^{-2}$  Вт/(см·К) [8]

| Газ | Температура, $10^4$ К |       |       |      |      |      |      |      |      |
|-----|-----------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|     | 2                     | 3     | 4     | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| He  | 0,51                  | 0,66  | 1,0   | 1,2  | 1,5  | 1,7  | 1,9  | 2,1  | 2,3  |
| Ne  | 0,17                  | 0,22  | 0,29  | 0,32 | 0,35 | 0,4  | 0,45 | 0,54 | 0,63 |
| Ar  | 0,055                 | 0,08  | 0,1   | 0,12 | 0,14 | 0,17 | 0,23 | 0,37 | 0,84 |
| Kr  | 0,032                 | 0,045 | 0,052 | 0,07 | 0,09 | 0,12 | 0,19 | 0,40 | 0,89 |
| Xe  | 0,024                 | 0,030 | 0,038 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,14 | 0,40 | 1,1  |

Таблица 20.9. Теплопроводность плазмы воздуха при атмосферном давлении и различной температуре  $10^{-2}$  Вт/(см·К) [10]

| $T$ , $10^3$ К | $\kappa$ | $T$ , $10^3$ К | $\kappa$ | $T$ , $10^3$ К | $\kappa$ | $T$ , $10^3$ К | $\kappa$ |
|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| 2              | 0,12     | 7              | 3,42     | 12             | 2,57     | 17             | 2,95     |
| 3              | 0,51     | 8              | 1,75     | 13             | 3,35     | 18             | 2,44     |
| 4              | 0,74     | 9              | 1,38     | 14             | 3,94     | 19             | 2,21     |
| 5              | 0,77     | 10             | 1,44     | 15             | 4,0      |                |          |
| 6              | 2,07     | 11             | 2,0      | 16             | 3,46     |                |          |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков В. Л., Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Химия плазмы/Под ред. Б. М. Смирнова. Вып. 10. М.: Энергоатомиздат. 1983.
2. Gallagher J. a. e.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1983. Vol. 12. P. 109—161.
3. Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат. 1974.
4. Мак-Даниель И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.
5. Linuma K. e. a.//J. Chem. Phys. 1983. Vol. 79. P. 3893—3904.
6. Lamm D. R. e. a.//Ibid. P. 1965—1973.
7. Bohringer H., Dugup-Ferguson M., Fahey D. W.//J. Chem. Phys. 1983. Vol. 79. P. 1974—1981.
8. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизованном газе. М.: Атомиздат. 1975.
9. Палкина Л. А., Смирнов Б. М./Теплофизика высокотемператур. 1974. Т. 12. С. 3—10.
10. Ролин Н. М./Инж.-физ. журн. 1978. Т. 34. С. 444—454.
11. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1972.

## Глава 21

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В. С. Егоров, И. Н. Хлюстиков

#### 21.1. ВВЕДЕНИЕ

К металлам относятся вещества, в которых при абсолютном нуле имеется одна или несколько не полностью заполненных электронами энергетических зон. Поверхность в конфигурационном (импульсном) пространстве, разграничивающая занятые и пустые состояния, носит название поверхности Ферми (ПФ). Наличием ПФ металлы отличаются от всех прочих веществ, а ее формой — друг от друга.

Сопротивление металлов электрическому току связано с процессами рассеяния электронов проводимости. Выражение для удельного сопротивления  $\rho$  имеет вид

$$\rho = \frac{m}{Ne^2\tau} = \frac{mv_\phi}{Ne^2 l}, \quad (21.1)$$

где  $m$ ,  $e$  — масса и заряд электрона;  $N$  — эффективная плотность электронов;  $v_\phi$  — скорость электрона на поверхности Ферми;  $\tau$  — среднее время жизни электрона

между двумя актами рассеяния;  $l$  — соответствующая средняя длина пробега.

Существуют два основных механизма рассеяния: 1) столкновение электронов с локальными неподвижными центрами — примесями, дефектами и пр.; 2) рассеяние тепловыми колебаниями решетки — фононами.

В меру независимости этих процессов эффективная частота соударений равна сумме частот соударений первого и второго процессов, т. е.  $1/\tau_{\phi} = 1/\tau_{\text{прим}} + 1/\tau_{\text{фон}}$ . Это приводит к правилу Матиссена

$$\rho_{\text{полн}} = \rho_{\text{ост}} + \rho_{\text{ид}}(T), \quad (21.2)$$

где  $\rho_{\text{ост}}$  — не зависящее от температуры  $T$  остаточное сопротивление, связанное с технологией данного образца металла и тем меньшее, чем совершеннее образец;  $\rho_{\text{ид}}(T)$  — сопротивление идеальной решетки данного металла, обусловленное рассеянием на фононах и сильно зависящее от температуры, которое описывается форму-

лой Блоха—Грюнайзена:

$$\rho_{\text{ид}} = \frac{KT^5}{M\theta^6} \int_0^{b/T} \frac{\xi d\xi}{(e^\xi - 1)(1 - e^{-\xi})}, \quad (21.3)$$

где  $K$  — постоянная, связанная с удельным объемом металла;  $M$  — атомная масса;  $\theta$  — характеристическая температура Дебая — параметр металла, характеризующий максимальную частоту колебаний решетки ( $\hbar\omega_{\text{max}} \approx k\theta$ ). Для высоких температур  $T/\theta \gg 1$

$$\rho = KT/4M\theta^2, \quad (21.4)$$

т. е. сопротивление растет с увеличением температуры линейно; для низких температур  $T/\theta \ll 1$

$$\rho = 124,4 KT^5/M\theta^6. \quad (21.5)$$

Для металлов с ПФ, близкой к сферической, закон  $\rho \propto T^5$  начинает выполняться при  $T \leq 0,1\theta$ . Для металлов со сложной ПФ этот закон начинает выполняться при гораздо более низких температурах, когда значение импульса тепловых фононов становится меньше всех характерных размеров поверхности Ферми. (Так, для висмута  $T \leq 0,1$  К).

Наличие некоторых примесей может заметно влиять на  $\rho_{\text{ид}}(T)$ , это является причиной отклонения от правила Матиссена.

Рассеяние на магнитных примесях приводит к логарифмически возрастающей с уменьшением температуры добавке к сопротивлению — эффекту Кондо, что используется в термометрии. Некоторые металлы при низких температурах переходят в сверхпроводящее состояние. Минимально возможная длина пробега (порядка межатомных расстояний) определяет максимальное металлическое удельное сопротивление  $\rho_{\text{max}}^{\text{мет}} \sim ah^2/e^2 \approx 0,2 \cdot 10^{-3}$  Ом·см ( $a$  — межатомное расстояние).

В этой главе значительное место уделено металлам и сплавам, находящим разнообразное применение в технике. В связи с этим приведены также характеристики некоторых неэлектрических свойств этих материалов, связанные с их электротехническим применением.

## 21.2. ЧИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ

Значения удельного сопротивления  $\rho_0$ ,  $10^{-6}$  Ом·см, и температурного коэффициента сопротивления  $\alpha_0 = -1/\rho_0(d\rho/dT)$ ,  $10^{-5}$  °C, при 0 °C представлены в табл. 21.1 [1]. В четвертом столбце приведены значения характеристической температуры  $\theta$ , полученные из измерений теплоемкости [2]. Из выражения (21.3) следует, что для любого металла приведенное сопротивление  $r = \rho_T/\rho_0$  должно быть универсальной функцией приведенной температуры  $T/\theta$ :

$$r_T = 1,056 (T/\theta) F(\theta/T). \quad (21.6)$$

Пользуясь табл. 21.1, можно получить значения удельного сопротивления в широком диапазоне температур

$$\rho_T = \rho_0 r_T / r_0, \quad (21.7)$$

где  $\rho_0$  и  $r_0$  — значения удельного и приведенного сопротивлений при 0 °C, а значения функции  $F(\theta/T)$  даны в табл. 21.2 [3]. В табл. 21.3 [4, 5] приведено удельное сопротивление анизотропных монокристаллов вдоль и поперек главной оси. Данные для графита [6—8] соответствуют как монокристаллам природного происхождения графита-1, так и искусственно выращенным монокристаллам пиролитического графита-2. В табл. 21.4 [9] приведены соотношения между сопротивлением и длиной про-

Таблица 21.1. Удельное сопротивление  $\rho_0$ , температурный коэффициент  $\alpha_0$  при 0 °C и характеристическая температура  $\theta$  чистых металлов [1, 2]

| Металл             | $10^{-6} \rho_0$ , Ом·см | $\alpha_0$ , $10^{-5}$ К <sup>-1</sup> | $\theta$ , К |
|--------------------|--------------------------|----------------------------------------|--------------|
| Алюминий           | 2,50                     | 460                                    | 433          |
| Барий              | 36                       | 649                                    | 111          |
| Бериллий           | 3,2                      | 900                                    | 1481         |
| Ванадий            | 18,2                     | 390                                    | 398          |
| Висмут             | 110,0                    | 454                                    | 120          |
| Вольфрам           | 4,89                     | 510                                    | 383          |
| Гадолиний          | 140                      | 176                                    | 182          |
| Галлий             | 40                       | 369                                    | 325          |
| Гафний             | 30                       | 440                                    | 252          |
| Гольмий            | 87                       | 171                                    | 190          |
| Диспрозий          | 56                       | 119                                    | 183          |
| Железо             | 8,6                      | 651                                    | 477          |
| Золото             | 2,06                     | 402                                    | 162          |
| Индий              | 8,19                     | 490                                    | 112          |
| Иридий             | 4,93                     | 411                                    | 420          |
| Иттербий           | 30                       | 130                                    | 118          |
| Кадмий             | 7,07                     | 462                                    | 210          |
| Калий              | 6,1                      | 673                                    | 91           |
| Кальций            | 4,06                     | 417                                    | 229          |
| Кобальт            | 5,57                     | 604                                    | 460          |
| Лантан             | 57,6                     | 213                                    | 150          |
| Литий              | 8,55                     | 489                                    | 344          |
| Лютеций            | 79                       | 240                                    | 183          |
| Магний             | 4,31                     | 412                                    | 403          |
| $\alpha$ -Марганец | 278                      | 50                                     | 409          |
| $\beta$ -Марганец  | 91                       | 136                                    | —            |
| $\gamma$ -Марганец | 39,2                     | 628                                    | —            |
| Медь               | 1,55                     | 433                                    | 347          |
| Молибден           | 5,03                     | 473                                    | 423          |
| Мышьяк             | 26                       | 475                                    | 282          |
| Натрий             | 4,28                     | 546                                    | 156          |
| Неодим             | 71                       | 200                                    | 163          |
| Никель             | 6,14                     | 692                                    | 477          |
| Ниобий             | 16,1                     | 343                                    | 276          |
| Олово              | 11,15                    | 465                                    | 199          |
| Осмий              | 9,5                      | 420                                    | 467          |
| Палладий           | 9,77                     | 377                                    | 271          |
| Платина            | 9,81                     | 396                                    | 237          |
| Полоний            | 42                       | 460                                    | —            |
| Празеодим          | 65,8                     | 171                                    | 152          |
| Рений              | 18,9                     | 455                                    | 416          |
| Родий              | 4,35                     | 462                                    | 512          |
| Ртуть              | 94,07                    | 99                                     | 72           |
| Рубидий            | 11,29                    | 637                                    | 56           |
| Рутений            | 7,16                     | 458                                    | 555          |
| Самарий            | 88                       | 148                                    | 169          |
| Свинец             | 19,2                     | 428                                    | 105          |
| Серебро            | 1,49                     | 430                                    | 227          |
| Стронций           | 30,3                     | 383                                    | 147          |
| Сурьма             | 39,0                     | 511                                    | 220          |
| Таллий             | 16,2                     | 517                                    | 78           |
| Тантал             | 12,4                     | 382                                    | 245          |
| Титан              | 42                       | 546                                    | 420          |
| Торий              | 13                       | 275                                    | 160          |
| Тулий              | 79                       | 195                                    | 200          |
| Уран               | 21                       | 282                                    | 248          |
| Хром               | 14,1                     | 301                                    | 606          |
| Цезий              | 18,1                     | 503                                    | 40           |
| Церий              | 72,7                     | 97                                     | 179          |
| Цинк               | 5,65                     | 417                                    | 328          |
| Цирконий           | 41                       | 440                                    | 290          |
| Эрбий              | 107                      | 252                                    | 188          |

Таблица 21.2. Значения функции  $F(\theta/T)$  при различных  $\theta/T$  [3]

| $\theta/T$ | $F(\theta/T)$ | $\theta/T$ | $F(\theta/T)$ |
|------------|---------------|------------|---------------|
| 0          | 1,0000        | 6,3        | 0,1942        |
| 0,1        | 0,9994        | 6,4        | 0,1867        |
| 0,2        | 0,9978        | 6,5        | 0,1795        |
| 0,3        | 0,9950        | 6,6        | 0,1725        |
| 0,4        | 0,9912        | 6,7        | 0,1658        |
| 0,5        | 0,9862        | 6,8        | 0,1593        |
| 0,6        | 0,9803        | 6,9        | 0,1531        |
| 0,7        | 0,9733        | 7,0        | 0,1471        |
| 0,8        | 0,9653        | 7,1        | 0,1414        |
| 0,9        | 0,9563        | 7,2        | 0,1359        |
| 1,0        | 0,9465        | 7,3        | 0,1306        |
| 1,1        | 0,9357        | 7,4        | 0,1255        |
| 1,2        | 0,9241        | 7,5        | 0,1206        |
| 1,3        | 0,9118        | 7,6        | 0,11599       |
| 1,4        | 0,8986        | 7,7        | 0,11150       |
| 1,5        | 0,8848        | 7,8        | 0,10719       |
| 1,6        | 0,8704        | 7,9        | 0,10306       |
| 1,7        | 0,8554        | 8,0        | 0,09909       |
| 1,8        | 0,8398        | 8,1        | 0,09529       |
| 1,9        | 0,8238        | 8,2        | 0,09165       |
| 2,0        | 0,8073        | 8,3        | 0,08816       |
| 2,1        | 0,7905        | 8,4        | 0,08480       |
| 2,2        | 0,7733        | 8,5        | 0,08159       |
| 2,3        | 0,7559        | 8,6        | 0,07851       |
| 2,4        | 0,7383        | 8,7        | 0,07555       |
| 2,5        | 0,7205        | 8,8        | 0,07272       |
| 2,6        | 0,7026        | 8,9        | 0,07000       |
| 2,7        | 0,6846        | 9,0        | 0,06740       |
| 2,8        | 0,6666        | 9,1        | 0,06490       |
| 2,9        | 0,6486        | 9,2        | 0,06250       |
| 3,0        | 0,6307        | 9,3        | 0,06021       |
| 3,1        | 0,6128        | 9,4        | 0,05800       |
| 3,2        | 0,5950        | 9,5        | 0,05589       |
| 3,3        | 0,5775        | 9,6        | 0,05386       |
| 3,4        | 0,5600        | 9,7        | 0,05192       |
| 3,5        | 0,5428        | 9,8        | 0,05005       |
| 3,6        | 0,5259        | 9,9        | 0,04826       |
| 3,7        | 0,5091        | 10,0       | 0,04655       |
| 3,8        | 0,4927        | 10,1       | 0,04490       |
| 3,9        | 0,4766        | 10,2       | 0,04332       |
| 4,0        | 0,4608        | 10,3       | 0,04181       |
| 4,1        | 0,4453        | 10,4       | 0,04035       |
| 4,2        | 0,4301        | 10,5       | 0,03896       |
| 4,3        | 0,4153        | 10,6       | 0,03762       |
| 4,4        | 0,4008        | 10,7       | 0,03633       |
| 4,5        | 0,3867        | 10,8       | 0,03509       |
| 4,6        | 0,3729        | 10,9       | 0,03390       |
| 4,7        | 0,3595        | 11,0       | 0,03276       |
| 4,8        | 0,3466        | 11,1       | 0,03167       |
| 4,9        | 0,3340        | 11,2       | 0,03061       |
| 5,0        | 0,3217        | 11,3       | 0,02960       |
| 5,1        | 0,3098        | 11,4       | 0,02863       |
| 5,2        | 0,2983        | 11,5       | 0,02769       |
| 5,3        | 0,2871        | 11,6       | 0,02680       |
| 5,4        | 0,2763        | 11,7       | 0,02593       |
| 5,5        | 0,2658        | 11,8       | 0,02510       |
| 5,6        | 0,2557        | 11,9       | 0,02430       |
| 5,7        | 0,2460        | 12,0       | 0,02353       |
| 5,8        | 0,2366        | 12,1       | 0,02279       |
| 5,9        | 0,2275        | 12,2       | 0,02208       |
| 6,0        | 0,2187        | 12,3       | 0,02139       |
| 6,1        | 0,2103        | 12,4       | 0,02073       |
| 6,2        | 0,2021        | 12,5       | 0,02009       |

Продолжение табл. 21.2

| $\theta/T$ | $F(\theta/T)$ | $\theta/T$ | $F(\theta/T)$ |
|------------|---------------|------------|---------------|
| 12,6       | 0,01948       | 17,6       | 0,005185      |
| 12,7       | 0,01889       | 17,8       | 0,004956      |
| 12,8       | 0,01832       | 18,0       | 0,004740      |
| 12,9       | 0,01777       | 19,0       | 0,003819      |
| 13,0       | 0,01725       | 20,0       | 0,003111      |
| 13,2       | 0,01624       | 22         | 0,002125      |
| 13,4       | 0,01531       | 24         | 0,001500      |
| 13,6       | 0,01445       | 26         | 0,001089      |
| 13,8       | 0,01364       | 28         | 0,0008097     |
| 14,0       | 0,01289       | 30         | 0,0006145     |
| 14,2       | 0,012185      | 32         | 0,0004747     |
| 14,4       | 0,011528      | 34         | 0,0003724     |
| 14,6       | 0,010915      | 36         | 0,0002963     |
| 14,8       | 0,010344      | 38         | 0,0002387     |
| 15,0       | 0,009805      | 40         | 0,0001944     |
| 15,2       | 0,009302      | 44         | 0,0001328     |
| 15,4       | 0,008831      | 48         | 0,00009375    |
| 15,6       | 0,008389      | 50         | 0,00007964    |
| 15,8       | 0,007974      | 52         | 0,00006806    |
| 16,0       | 0,007584      | 56         | 0,00005061    |
| 16,2       | 0,007218      | 60         | 0,00003841    |
| 16,4       | 0,006873      | 64         | 0,00002967    |
| 16,6       | 0,006549      | 68         | 0,00002328    |
| 16,8       | 0,006243      | 70         | 0,00002073    |
| 17,0       | 0,005955      | 72         | 0,00001852    |
| 17,2       | 0,005683      | 76         | 0,00001492    |
| 17,4       | 0,005427      | 80         | 0,00001215    |

волок в диапазоне значений диаметра от 0,05 до 4,0 мм и удельного сопротивления материала от  $0,016 \cdot 10^{-4}$  до  $1,4 \cdot 10^{-4}$  Ом·см.

**Жидкие металлы.** При плавлении сопротивление большинства металлов увеличивается. У металлов, объем которых уменьшается при плавлении (висмут, сурьма, галлий), сопротивление уменьшается (табл. 21.5, 21.6, рис. 21.1, 21.2).

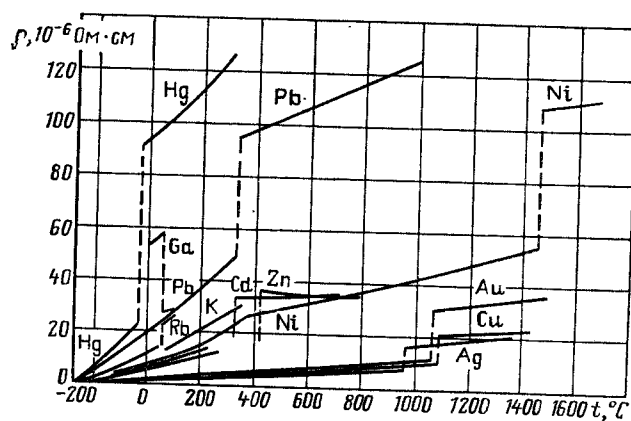


Рис. 21.1. Изменение сопротивления с температурой некоторых металлов в твердом и жидком состояниях [9]

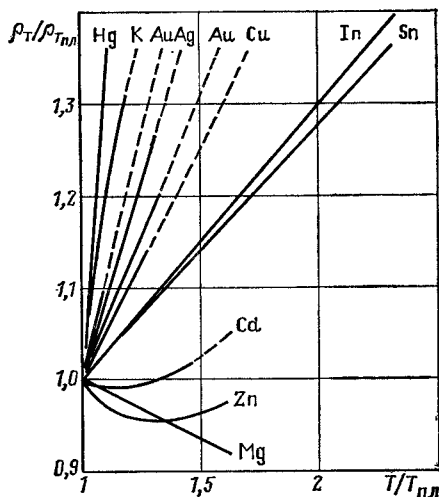


Рис. 21.2. Зависимость относительного удельного сопротивления различных жидких металлов  $\rho_T/\rho_{T_{пл}}$  от  $T/T_{пл}$  [4] пунктир — экстраполяция)

### 21.3. ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Сопротивление металлов, как правило, уменьшается при приложении к ним внешнего гидростатического давления  $P$ . Зависимость  $R(P)$  некоторых металлов может быть не монотонной, на ней имеют место изломы и скачки, обусловленные фазовыми превращениями, что используется в физике высоких давлений в качестве реперных точек. В табл. 21.7 дается относительное изменение сопротивления (но не удельного сопротивления, для которого необходимо учитывать изменения размеров) с обратным знаком в диапазоне  $0 < P \leq 10$  ГПа. Все данные соответствуют измерениям при температурах 25—30° С [1].

Таблица 21.4. Сопротивление и длина проволок диаметром от 0,05 до 4,0 мм

| Диаметр, мм                            | 0,016   | 0,017   | 0,018   | 0,019   | 0,020   | 0,025   | 0,027   | 0,030   | 0,04    | 0,05   | 0,06   |
|----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| Сопротивление проволоки длиной 1 м, Ом |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        |        |
| 0,05                                   | 8,15    | 8,66    | 9,17    | 9,68    | 10,19   | 12,73   | 13,75   | 15,3    | 20,4    | 25,5   | 30,6   |
| 0,10                                   | 2,04    | 2,16    | 2,29    | 2,42    | 2,55    | 3,18    | 3,44    | 3,8     | 5,1     | 6,4    | 7,6    |
| 0,15                                   | 0,91    | 0,96    | 1,02    | 1,07    | 1,13    | 1,41    | 1,53    | 1,70    | 2,26    | 2,83   | 3,4    |
| 0,20                                   | 0,51    | 0,54    | 0,57    | 0,60    | 0,64    | 0,80    | 0,859   | 0,95    | 1,27    | 1,59   | 1,91   |
| 0,25                                   | 0,33    | 0,35    | 0,37    | 0,39    | 0,41    | 0,51    | 0,550   | 0,61    | 0,81    | 1,02   | 1,22   |
| 0,30                                   | 0,226   | 0,240   | 0,255   | 0,269   | 0,283   | 0,354   | 0,382   | 0,424   | 0,566   | 0,707  | 0,849  |
| 0,40                                   | 0,127   | 0,135   | 0,143   | 0,151   | 0,159   | 0,199   | 0,215   | 0,239   | 0,318   | 0,398  | 0,477  |
| 0,50                                   | 0,081   | 0,087   | 0,092   | 0,097   | 0,102   | 0,127   | 0,138   | 0,153   | 0,204   | 0,255  | 0,306  |
| 0,60                                   | 0,057   | 0,060   | 0,064   | 0,067   | 0,071   | 0,088   | 0,0955  | 0,106   | 0,141   | 0,177  | 0,212  |
| 0,70                                   | 0,042   | 0,044   | 0,047   | 0,049   | 0,052   | 0,065   | 0,0702  | 0,078   | 0,104   | 0,130  | 0,156  |
| 0,80                                   | 0,0318  | 0,0338  | 0,0358  | 0,0378  | 0,0398  | 0,0497  | 0,0537  | 0,060   | 0,080   | 0,099  | 0,119  |
| 1,00                                   | 0,0204  | 0,0216  | 0,0229  | 0,0242  | 0,0255  | 0,0318  | 0,0344  | 0,038   | 0,051   | 0,064  | 0,076  |
| 1,2                                    | 0,0142  | 0,0150  | 0,0159  | 0,0168  | 0,0177  | 0,0221  | 0,0239  | 0,0265  | 0,0354  | 0,0442 | 0,053  |
| 1,4                                    | 0,0104  | 0,0110  | 0,0117  | 0,0123  | 0,0130  | 0,0162  | 0,0175  | 0,0195  | 0,0260  | 0,0325 | 0,039  |
| 1,6                                    | 0,0080  | 0,0085  | 0,0090  | 0,0095  | 0,0099  | 0,0124  | 0,0134  | 0,0149  | 0,0199  | 0,0249 | 0,0298 |
| 2,0                                    | 0,0051  | 0,0054  | 0,0057  | 0,0060  | 0,0064  | 0,0080  | 0,00859 | 0,0095  | 0,0127  | 0,0159 | 0,0191 |
| 2,5                                    | 0,00326 | 0,00346 | 0,00367 | 0,00387 | 0,00407 | 0,0051  | 0,00550 | 0,0061  | 0,0081  | 0,0102 | 0,0122 |
| 3,0                                    | 0,00226 | 0,00240 | 0,00255 | 0,00269 | 0,00283 | 0,0035  | 0,00382 | 0,0042  | 0,0057  | 0,0071 | 0,0085 |
| 3,5                                    | 0,00166 | 0,00177 | 0,00187 | 0,00197 | 0,00208 | 0,00260 | 0,00281 | 0,00312 | 0,00416 | 0,0052 | 0,0062 |
| 4,0                                    | 0,00127 | 0,00135 | 0,00143 | 0,00151 | 0,00159 | 0,00199 | 0,00215 | 0,00239 | 0,00318 | 0,0040 | 0,0048 |
| Длина проволоки сопротивлением 1 Ом, м |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        |        |
| 0,05                                   | 0,123   | 0,115   | 0,109   | 0,103   | 0,098   | 0,079   | 0,073   | 0,065   | 0,049   | 0,039  | 0,0327 |
| 0,10                                   | 0,49    | 0,46    | 0,44    | 0,41    | 0,39    | 0,314   | 0,291   | 0,262   | 0,196   | 0,157  | 0,131  |
| 0,15                                   | 1,11    | 1,04    | 0,98    | 0,93    | 0,88    | 0,71    | 0,655   | 0,59    | 0,44    | 0,35   | 0,295  |
| 0,20                                   | 1,96    | 1,85    | 1,75    | 1,65    | 1,57    | 1,26    | 1,16    | 1,05    | 0,79    | 0,63   | 0,52   |
| 0,25                                   | 3,07    | 2,89    | 2,73    | 2,58    | 2,45    | 1,96    | 1,82    | 1,64    | 1,23    | 0,98   | 0,82   |
| 0,30                                   | 4,4     | 4,2     | 3,9     | 3,7     | 3,5     | 2,83    | 2,62    | 2,36    | 1,77    | 1,41   | 1,18   |
| 0,40                                   | 7,9     | 7,4     | 7,0     | 6,6     | 6,3     | 5,03    | 4,65    | 4,19    | 3,14    | 2,51   | 2,09   |
| 0,50                                   | 12,3    | 11,5    | 10,9    | 10,3    | 9,8     | 7,85    | 7,27    | 6,54    | 4,91    | 3,93   | 3,27   |
| 0,60                                   | 17,6    | 16,6    | 15,7    | 14,9    | 14,1    | 11,3    | 10,5    | 9,4     | 7,1     | 5,7    | 4,7    |
| 0,70                                   | 24,0    | 22,6    | 21,4    | 20,3    | 19,2    | 15,4    | 14,3    | 12,8    | 9,6     | 7,7    | 6,4    |
| 0,80                                   | 31,4    | 29,6    | 27,9    | 26,4    | 25,1    | 20,1    | 18,6    | 16,8    | 12,6    | 10,1   | 8,4    |
| 1,00                                   | 49,1    | 46,2    | 43,6    | 41,3    | 39,3    | 31,4    | 29,1    | 26,2    | 19,6    | 15,7   | 13,1   |
| 1,2                                    | 71      | 66      | 63      | 59      | 57      | 45      | 41,9    | 37,7    | 28,3    | 22,6   | 18,8   |
| 1,4                                    | 96      | 90      | 86      | 81      | 77      | 62      | 57,0    | 51,3    | 38,5    | 30,8   | 25,7   |
| 1,6                                    | 126     | 118     | 112     | 106     | 101     | 80      | 74,5    | 67      | 50      | 40     | 33,5   |
| 2,0                                    | 196     | 185     | 175     | 165     | 157     | 126     | 116     | 105     | 79      | 63     | 52,4   |
| 2,5                                    | 307     | 289     | 273     | 258     | 245     | 196     | 182     | 164     | 123     | 98     | 82     |
| 3,0                                    | 442     | 416     | 393     | 372     | 353     | 283     | 262     | 236     | 177     | 141    | 118    |
| 3,5                                    | 601     | 566     | 535     | 506     | 481     | 385     | 356     | 321     | 241     | 192    | 160    |
| 4,0                                    | 785     | 739     | 698     | 661     | 628     | 503     | 465     | 419     | 314     | 251    | 209    |

Таблица 21.3. Удельное сопротивление для анизотропных металлических кристаллов [4—8]

| Металл    | $t, ^\circ\text{C}$ | Кристаллическая структура | $\rho_{\parallel} \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $\rho_{\perp} \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ | Металл | $t, ^\circ\text{C}$ | Кристаллическая структура | $\rho_{\parallel} \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $\rho_{\perp} \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ |
|-----------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Бериллий  | 0                   | Гекс.                     | 3,58                                                      | 3,12                                                  | 0,88                            | Кадмий | 0                   | »                         | 7,73                                                      | 6,35                                                  | 0,87                            |
| Висмут    | 0                   | Ромб.                     | 127                                                       | 99                                                    | 78                              | Магний | 0                   | »                         | 3,58                                                      | 4,22                                                  | 1,21                            |
| Вольфрам  | -183                | Куб.                      | 0,892                                                     | 0,843                                                 | 0,945                           | Мышьяк | 0                   | »                         | 26                                                        | 23,8                                                  | 0,92                            |
|           |                     |                           | [100]                                                     | [111]                                                 |                                 | Олово  | 0                   | Тетр.                     | 9,09                                                      | 13,08                                                 | 1,46                            |
| Галлий    | 20                  | Ромб.                     | 55,5                                                      | 17,3                                                  | 0,31                            | Ртуть  | -45,5               | Ромб.                     | 17,8                                                      | 23,5                                                  | 1,32                            |
| Гафний    | 0                   | Гекс.                     | 32,7                                                      | 32,0                                                  | 0,98                            | Сурьма | 0                   | »                         | 26,3                                                      | 36,0                                                  | 1,37                            |
| Графит 1* | 20                  | »                         | 5400                                                      | 41                                                    | $7,6 \cdot 10^{-3}$             | Цинк   | 0                   | Гекс.                     | 5,59                                                      | 5,39                                                  | 0,96                            |
|           | -195                | »                         | 2300                                                      | 20                                                    | $8,7 \cdot 10^{-3}$             |        |                     |                           |                                                           |                                                       |                                 |
| Графит 2* | 20                  | »                         | $1,7 \cdot 10^5$                                          | 44,3                                                  | $2,6 \cdot 10^{-4}$             |        |                     |                           |                                                           |                                                       |                                 |
|           | -195                | »                         | $3 \cdot 10^5$                                            | 25,9                                                  | $8,6 \cdot 10^{-5}$             |        |                     |                           |                                                           |                                                       |                                 |

\* Графит 1 и графит 2 — природный и искусственный пироли- тический.

с удельным сопротивлением от  $0,016$  до  $1,40 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  [9]

| Диаметр, мм | 0,07   | 0,08   | 0,10   | 0,15   | 0,20   | 0,25   | 0,30   | 0,40   | 0,50   | 0,60   | 0,75   | 0,85   | 1,00   | 1,10   | 1,20   | 1,40   |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,05        | 36     | 41     | 51     | 76     | 102    | 127    | 153    | 204    | 255    | 306    | 382    | 433    | 509    | 560    | 611    | 713    |
| 0,10        | 8,9    | 10,2   | 12,7   | 19,1   | 25,5   | 31,8   | 38     | 51     | 64     | 76,4   | 95,5   | 108    | 127    | 140    | 153    | 178    |
| 0,15        | 4,0    | 4,5    | 5,7    | 8,5    | 11,3   | 14,1   | 17,0   | 22,6   | 28,3   | 33,9   | 42,4   | 48     | 56,6   | 62,2   | 67,9   | 79,2   |
| 0,20        | 2,23   | 2,55   | 3,18   | 4,8    | 6,4    | 8,0    | 9,5    | 12,7   | 15,9   | 19,1   | 23,9   | 27,1   | 31,8   | 35,0   | 38,2   | 44,6   |
| 0,25        | 1,43   | 1,63   | 2,04   | 3,06   | 4,1    | 5,1    | 6,1    | 8,1    | 10,2   | 12,2   | 15,3   | 17,3   | 20,4   | 22,4   | 24,4   | 28,5   |
| 0,30        | 0,99   | 1,13   | 1,41   | 2,12   | 2,83   | 3,54   | 4,24   | 5,66   | 7,07   | 8,49   | 10,6   | 12,0   | 14,1   | 15,6   | 17,0   | 19,8   |
| 0,40        | 0,56   | 0,64   | 0,80   | 1,19   | 1,59   | 1,99   | 2,39   | 3,18   | 3,98   | 4,78   | 5,97   | 6,76   | 7,96   | 8,76   | 9,55   | 11,1   |
| 0,50        | 0,36   | 0,41   | 0,51   | 0,76   | 1,02   | 1,27   | 1,53   | 2,04   | 2,55   | 3,06   | 3,82   | 4,33   | 5,09   | 5,60   | 6,11   | 7,13   |
| 0,60        | 0,248  | 0,283  | 0,354  | 0,53   | 0,71   | 0,88   | 1,06   | 1,41   | 1,77   | 2,12   | 2,65   | 3,00   | 3,54   | 3,89   | 4,24   | 4,95   |
| 0,70        | 0,182  | 0,208  | 0,260  | 0,39   | 0,52   | 0,65   | 0,78   | 1,04   | 1,30   | 1,56   | 1,95   | 2,21   | 2,60   | 2,86   | 3,12   | 3,64   |
| 0,80        | 0,139  | 0,159  | 0,199  | 0,298  | 0,398  | 0,497  | 0,60   | 0,80   | 0,99   | 1,19   | 1,49   | 1,69   | 1,99   | 2,19   | 2,39   | 2,79   |
| 1,00        | 0,080  | 0,102  | 0,127  | 0,191  | 0,255  | 0,318  | 0,38   | 0,51   | 0,64   | 0,764  | 0,955  | 1,08   | 1,27   | 1,40   | 1,53   | 1,78   |
| 1,2         | 0,062  | 0,071  | 0,088  | 0,133  | 0,177  | 0,221  | 0,265  | 0,354  | 0,442  | 0,531  | 0,663  | 0,75   | 0,884  | 0,973  | 1,06   | 1,24   |
| 1,4         | 0,045  | 0,052  | 0,065  | 0,097  | 0,130  | 0,162  | 0,195  | 0,260  | 0,325  | 0,390  | 0,487  | 0,55   | 0,650  | 0,715  | 0,779  | 0,909  |
| 1,6         | 0,0348 | 0,0398 | 0,0497 | 0,075  | 0,099  | 0,124  | 0,149  | 0,199  | 0,249  | 0,298  | 0,373  | 0,423  | 0,497  | 0,547  | 0,597  | 0,696  |
| 2,0         | 0,0223 | 0,0255 | 0,0318 | 0,048  | 0,064  | 0,080  | 0,095  | 0,127  | 0,159  | 0,191  | 0,239  | 0,271  | 0,318  | 0,350  | 0,382  | 0,446  |
| 2,5         | 0,0143 | 0,0163 | 0,0204 | 0,0305 | 0,0407 | 0,051  | 0,061  | 0,081  | 0,102  | 0,122  | 0,153  | 0,173  | 0,204  | 0,224  | 0,244  | 0,285  |
| 3,0         | 0,0099 | 0,0113 | 0,0141 | 0,0212 | 0,0283 | 0,035  | 0,042  | 0,057  | 0,071  | 0,085  | 0,106  | 0,120  | 0,141  | 0,156  | 0,170  | 0,198  |
| 3,5         | 0,0073 | 0,0083 | 0,0104 | 0,0156 | 0,0208 | 0,0260 | 0,0312 | 0,0416 | 0,052  | 0,062  | 0,078  | 0,088  | 0,104  | 0,114  | 0,125  | 0,146  |
| 4,0         | 0,0056 | 0,0064 | 0,0080 | 0,0119 | 0,0159 | 0,0199 | 0,0239 | 0,0318 | 0,040  | 0,048  | 0,060  | 0,068  | 0,080  | 0,087  | 0,095  | 0,111  |
| 0,05        | 0,0280 | 0,0245 | 0,0196 | 0,0131 | 0,0098 | 0,0079 | 0,0065 | 0,0049 | 0,0039 | 0,0033 | 0,0026 | 0,0023 | 0,0020 | 0,0018 | 0,0016 | 0,0014 |
| 0,10        | 0,112  | 0,098  | 0,079  | 0,052  | 0,039  | 0,0314 | 0,0262 | 0,0196 | 0,0157 | 0,0131 | 0,0105 | 0,0092 | 0,0078 | 0,0071 | 0,0065 | 0,0056 |
| 0,15        | 0,252  | 0,221  | 0,177  | 0,118  | 0,088  | 0,071  | 0,059  | 0,044  | 0,035  | 0,0295 | 0,0236 | 0,0208 | 0,0177 | 0,0161 | 0,0147 | 0,0126 |
| 0,20        | 0,45   | 0,39   | 0,314  | 0,209  | 0,157  | 0,126  | 0,105  | 0,079  | 0,063  | 0,0524 | 0,0419 | 0,0370 | 0,0314 | 0,0286 | 0,0262 | 0,0224 |
| 0,25        | 0,70   | 0,61   | 0,49   | 0,327  | 0,245  | 0,196  | 0,164  | 0,123  | 0,098  | 0,0818 | 0,0655 | 0,0578 | 0,0491 | 0,0446 | 0,0409 | 0,0351 |
| 0,30        | 1,01   | 0,88   | 0,71   | 0,47   | 0,35   | 0,283  | 0,236  | 0,177  | 0,141  | 0,118  | 0,0943 | 0,083  | 0,0707 | 0,0643 | 0,0589 | 0,0505 |
| 0,40        | 1,80   | 1,57   | 1,26   | 0,84   | 0,63   | 0,503  | 0,419  | 0,314  | 0,251  | 0,209  | 0,168  | 0,148  | 0,126  | 0,114  | 0,105  | 0,0898 |
| 0,50        | 2,80   | 2,45   | 1,96   | 1,31   | 0,98   | 0,785  | 0,654  | 0,491  | 0,393  | 0,327  | 0,262  | 0,231  | 0,196  | 0,179  | 0,164  | 0,140  |
| 0,60        | 4,0    | 3,53   | 2,83   | 1,88   | 1,41   | 1,13   | 0,94   | 0,71   | 0,57   | 0,471  | 0,377  | 0,332  | 0,283  | 0,257  | 0,236  | 0,202  |
| 0,70        | 5,5    | 4,81   | 3,85   | 2,57   | 1,92   | 1,54   | 1,28   | 0,96   | 0,77   | 0,641  | 0,513  | 0,453  | 0,385  | 0,350  | 0,321  | 0,275  |
| 0,80        | 7,2    | 6,3    | 5,0    | 3,25   | 2,51   | 2,01   | 1,68   | 1,26   | 1,01   | 0,838  | 0,670  | 0,592  | 0,503  | 0,457  | 0,419  | 0,359  |
| 1,00        | 11,2   | 9,8    | 7,9    | 5,24   | 3,93   | 3,14   | 2,62   | 1,96   | 1,57   | 1,31   | 1,05   | 0,924  | 0,785  | 0,714  | 0,655  | 0,561  |
| 1,20        | 16,2   | 14,1   | 11,3   | 7,5    | 5,7    | 4,5    | 3,77   | 2,83   | 2,26   | 1,89   | 1,51   | 1,33   | 1,13   | 1,03   | 0,943  | 0,808  |
| 1,40        | 22,0   | 19,2   | 15,4   | 10,3   | 7,7    | 6,2    | 5,13   | 3,85   | 3,08   | 2,57   | 2,05   | 1,81   | 1,54   | 1,40   | 1,28   | 1,10   |
| 1,60        | 28,7   | 25,1   | 20,1   | 13,4   | 10,1   | 8,0    | 6,7    | 5,0    | 4,0    | 3,35   | 2,68   | 2,37   | 2,01   | 1,83   | 1,68   | 1,44   |
| 2,0         | 44,9   | 39,2   | 31,4   | 20,9   | 15,7   | 12,6   | 10,5   | 7,9    | 6,3    | 5,24   | 4,19   | 3,7    | 3,14   | 2,86   | 2,62   | 2,24   |
| 2,5         | 70     | 61     | 49     | 32,7   | 24,5   | 19,6   | 16,4   | 12,3   | 9,8    | 8,18   | 6,55   | 5,8    | 4,91   | 4,46   | 4,09   | 3,51   |
| 3,0         | 101    | 88     | 71     | 47,1   | 35,3   | 28,3   | 21,6   | 17,7   | 14,1   | 11,8   | 9,43   | 8,3    | 7,07   | 6,43   | 5,89   | 5,05   |
| 3,5         | 137    | 120    | 96     | 64     | 48     | 38,5   | 32,1   | 24,1   | 19,2   | 16,0   | 12,8   | 11,3   | 9,62   | 8,75   | 8,02   | 6,87   |
| 4,0         | 180    | 175    | 126    | 84     | 63     | 50,3   | 41,9   | 31,4   | 25,1   | 20,9   | 16,8   | 14,8   | 12,6   | 11,4   | 10,5   | 8,98   |



Таблица 21.5. Изменение сопротивления и объема некоторых металлов при плавлении [1]

Продолжение табл. 21.5

| Металл   | $t_{пл}, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{ж}^*, 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ | $\rho_{ж}/\rho_{ТВ}$ | $\Delta V/V_{ж}$ | Металл  | $t_{пл}, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{ж}^*, 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ | $\rho_{ж}/\rho_{ТВ}$ | $\Delta V/V_{ж}$ |
|----------|--------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|------------------|---------|--------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|------------------|
| Алюминий | 660                      | 20,1                                             | 1,64                 | +0,048           | Магний  | 651                      | 27,9                                             | 1,63                 | +0,041           |
| Висмут   | 271                      | 123                                              | 0,43                 | -0,033           | Медь    | 1083                     | 21,5                                             | 2,07                 | +0,042           |
| Галлий   | 29,9                     | 25,9                                             | 0,58                 | -0,03            | Натрий  | 97,6                     | —                                                | 1,45                 | +0,027           |
| Железо   | 1535                     | 139                                              | 1,09                 | +0,03            | Олово   | 327,4                    | 99,3                                             | 2,07                 | +0,035           |
| Золото   | 1063                     | 30,8                                             | 2,28                 | +0,051           | Ртуть   | -38,9                    | 90                                               | 3,36                 | +0,037           |
| Индий    | 156                      | —                                                | 2,12                 | —                | Рубидий | 38,7                     | —                                                | 1,61                 | +0,028           |
| Кадмий   | 321                      | —                                                | 1,89                 | +0,05            | Серебро | 961                      | 16,4                                             | 1,9                  | +0,038           |
| Калий    | 62,5                     | —                                                | 1,56                 | +0,026           | Сурьма  | 630                      | 108                                              | 0,71                 | -0,09            |
| Литий    | 180                      | —                                                | 1,68                 | +0,017           | Таллий  | 302                      | —                                                | 2,0                  | +0,03            |
|          |                          |                                                  |                      |                  | Цинк    | 420                      | 32,6                                             | 2,11                 | +0,042           |
|          |                          |                                                  |                      |                  | Цезий   | 29,7                     | —                                                | 1,66                 | +0,026           |

Таблица 21.6. Удельное сопротивление некоторых жидких металлов  $\rho$ ,  $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  [9]

| $^\circ\text{C}$ | K     | $\text{K}_{66}\text{Na}_{44}$ | $\text{K}_{78}\text{Na}_{22}$ | Cu   | Ni               | Sn   | Sb  | Zn                | Cd   | Al   | Fe  | Pb  |
|------------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|------|------------------|------|-----|-------------------|------|------|-----|-----|
| 100              | 15,49 | 41,61                         | 45,63                         | —    | —                | —    | —   | —                 | —    | —    | —   | —   |
| 200              | 21,8  | 47,23                         | 51,33                         | —    | —                | —    | —   | —                 | —    | —    | —   | —   |
| 300              | 28,2  | 54,33                         | 58,58                         | —    | —                | 49,4 | —   | —                 | —    | —    | —   | —   |
| 400              | —     | 62,21                         | 65,65                         | —    | —                | 51,6 | —   | —                 | 33,7 | —    | —   | 98  |
| 500              | —     | 69,37                         | 73,48                         | —    | —                | 53,9 | —   | 34,5 <sub>5</sub> | 34,1 | —    | —   | 103 |
| 600              | —     | 78,29                         | 82,61                         | —    | —                | 56,0 | —   | 35,5 <sub>5</sub> | 34,8 | —    | —   | 107 |
| 700              | —     | 88,23                         | 91,76                         | —    | —                | 58,3 | 129 | 35,6 <sub>5</sub> | 35,8 | 27,8 | —   | 112 |
| 800              | —     | 99,68                         | 104,51                        | —    | —                | 60,5 | 131 | 35,7 <sub>0</sub> | —    | 29,3 | —   | 116 |
| 900              | —     | —                             | —                             | —    | —                | 62,7 | 133 | 35,7 <sub>5</sub> | —    | 30,8 | —   | 121 |
| 1000             | —     | —                             | —                             | —    | —                | 65,0 | 135 | —                 | —    | 32,2 | —   | 126 |
| 1100             | —     | —                             | —                             | 21,5 | —                | 67,2 | 138 | —                 | —    | 33,7 | —   | —   |
| 1200             | —     | —                             | —                             | 22,4 | —                | 69,5 | 140 | —                 | —    | 35,2 | —   | —   |
| 1300             | —     | —                             | —                             | 23,3 | —                | 71,7 | —   | —                 | —    | —    | —   | —   |
| 1400             | —     | —                             | —                             | 24,2 | —                | 74,0 | —   | —                 | —    | —    | —   | —   |
| 1500             | —     | —                             | —                             | 25,0 | 109              | 76,2 | —   | —                 | —    | —    | —   | —   |
| 1550             | —     | —                             | —                             | —    | 110              | —    | —   | —                 | —    | —    | 133 | —   |
| 1600             | —     | —                             | —                             | —    | 110 <sub>5</sub> | —    | —   | —                 | —    | —    | 136 | —   |
| 1650             | —     | —                             | —                             | —    | 111 <sub>5</sub> | —    | —   | —                 | —    | —    | 138 | —   |

Таблица 21.7. Относительное изменение сопротивления чистых металлов  $-\Delta R/R_0 = -(R_p - R_0)/R_0$  при всестороннем сжатии, % [1]

| Металл                              | Давление, $10^8$ Па |       |        |        |        |        |       |        |        |        |        |
|-------------------------------------|---------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                                     | 5                   | 10    | 20     | 30     | 40     | 50     | 60    | 70     | 80     | 90     | 100    |
| Алюминий                            | 2,15                | 4,06  | 7,66   | 10,8   | 13,5   | —      | 17,6  | —      | 20,6   | —      | 23,0   |
| Барий* <sup>1</sup>                 | —24,5               | —55,6 | —137,7 | —246,6 | —358   | —296   | —137  | —89    | —81,5  | —80,5  | —81    |
| Бериллий                            | 0,85                | 1,6   | 3,1    | 4,6    | 5,9    | 7,1    | 8,3   | 9,4    | 10,4   | 11,6   | 12,4   |
| Ванадий                             | —                   | 1,6   | 3,1    | 4,6    | 5,9    | 7,1    | 8,4   | 9,4    | 10,5   | 11,5   | 12,2   |
| Висмут* <sup>2</sup>                | —6,5                | —15,2 | —38,3  | 39,6   | 43,3   | 45,4   | 47,2  | 48,3   | 50,2   | 51,5   | 52,6   |
| Вольфрам                            | 0,66                | 1,305 | 2,554  | 3,744  | 4,9    | 6,0    | 7,0   | 8,0    | 8,9    | 9,7    | 10,5   |
| Гадолиний                           | —                   | 4,6   | 8,8    | 19,9   | 23,6   | 26,8   | 29,4  | 31,6   | 33,3   | 34,8   | 35,9   |
| Галлий* <sup>3</sup>                | 2,65                | 5,31  | —      | —      | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —      |
| Гафний                              | —                   | 0,87  | 1,63   | 2,27   | 2,79   | 3,16   | 3,48  | 3,74   | 3,93   | 4,08   | 4,19   |
| Гольмий                             | —                   | 2,2   | 4,4    | 6,6    | 9,0    | 11,6   | 13,8  | 15,7   | 17,3   | 18,4   | 19,2   |
| Диспрозий                           | —                   | 2,3   | 4,7    | 7,0    | 9,1    | 10,6   | 12,0  | 13,2   | 15,2   | 17,1   | 16,3   |
| Железо                              | 1,2                 | 2,3   | 4,4    | 6,4    | 8,1    | 19,7   | 11,2  | 12,5   | 13,8   | 14,9   | 15,9   |
| Золото                              | 1,5                 | 2,9   | 5,6    | 8,1    | 10,4   | 12,6   | 14,5  | 16,0   | 17,1   | 17,9   | 18,4   |
| Индий                               | 1,7                 | 12,2  | 21,4   | 28,3   | 34,1   | 39,0   | 43,5  | 47,1   | 50,4   | 53,5   | 56,2   |
| Иридий                              | 0,69                | 1,368 | 2,694  | 3,978  | 5,2    | 6,4    | 7,6   | 8,6    | 9,6    | 10,5   | 11,4   |
| Иттербий                            | —                   | —97   | —288   | —624   | —101,3 | —11,85 | —     | 21,14  | 23,04  | 24,12  | 24,67  |
| Кадмий                              | 3,95                | 7,32  | 12,8   | 17,16  | 20,8   | 23,8   | 26,4  | 28,7   | 30,7   | 32,5   | 34,2   |
| Калий                               | 50,9                | 69,7  | 81,8   | 82,2   | 79,7   | 74,8   | 69,1  | 63,0   | 56,1   | 48,6   | 40,4   |
| Кальций                             | —7,2                | —15,2 | —33,4  | —56,7  | —81,1  | —106,9 | —134  | —161,8 | —191,6 | —224,4 | —265,0 |
| Кобальт                             | 0,465               | 0,904 | 1,704  | 2,397  | 3,0    | 3,5    | 3,9   | 4,2    | 4,5    | 4,7    | 4,9    |
| Лантан* <sup>4</sup>                | 0,9                 | 1,7   | 3,5    | 10,6   | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —      |
| Литий                               | —3,5                | —7,2  | —5,2   | —23,9  | —30,5  | —36,6  | —42,8 | —48,7  | —55,1  | —12,3  | —70,4  |
| Лютеций                             | —                   | 1,31  | 2,86   | 4,75   | 6,40   | 7,81   | 9,03  | 10,09  | 10,98  | 11,75  | 12,39  |
| Магний                              | 2,29                | 4,7   | 8,4    | 11,4   | 14,1   | 16,3   | 18,3  | 20,0   | 21,4   | 22,4   | 23,3   |
| Марганец                            | 1,92                | 3,54  | 6,08   | 7,89   | 9,1    | 10,0   | 10,8  | 11,7   | 12,8   | 14,4   | 15,9   |
| Медь                                | 0,9                 | 1,8   | 3,5    | 5,1    | 6,6    | 8,0    | 9,3   | 10,5   | 11,6   | 12,5   | 13,4   |
| Молибден                            | 0,65                | 1,289 | 2,532  | 3,729  | 4,9    | 6,0    | 7,1   | 8,1    | 9,1    | 10,0   | 10,8   |
| Мышьяк, $\perp C$                   | —                   | 6,7   | 11,8   | 15,6   | 18,6   | 21,1   | 23,3  | 25,0   | 26,6   | 28,2   | 30,2   |
| Натрий                              | 24,6                | 38,2  | 51,8   | 58,2   | 60,8   | 61,0   | 60,1  | 58,8   | 57,0   | 54,8   | 52,1   |
| Неодим                              | 0,9                 | 1,5   | 3,1    | 4,0    | 4,5    | 4,7    | 4,7   | 4,7    | 4,6    | 4,3    | 3,8    |
| Никель* <sup>5</sup>                | 0,9                 | 1,824 | 3,552  | 5,184  | 6,7    | 8,2    | 9,6   | 10,8   | 12,0   | 13,1   | 14,2   |
| Нюбий                               | 0,69                | 1,366 | 2,662  | 3,888  | 5,0    | 6,2    | 7,2   | 8,2    | 9,1    | 9,9    | 10,6   |
| Олово                               | 4,9                 | 9,2   | 16,5   | 22,5   | 27,6   | 31,7   | 35,3  | 38,2   | 40,8   | 43,1   | 45,2   |
| Осмий                               | —                   | —     | —      | —      | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —      |
| Палладий                            | 1,05                | 2,10  | 4,2    | 6,3    | 7,5    | 9,1    | 10,6  | 11,9   | 13,1   | 14,2   | 15,3   |
| Платина                             | 0,95                | 1,879 | 3,664  | 5,340  | 6,9    | 8,4    | 9,7   | 10,9   | 12,0   | 13,0   | 13,9   |
| Полоний                             | —                   | —     | —      | —      | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —      |
| Празеодим                           | 0,3                 | 0,4   | 0,4    | 0,2    | —0,1   | 0,6    | 6,9   | 11,1   | 12,0   | 11,8   | 11,0   |
| Рений ( $\Delta R/R_{20}$ )         | —                   | 14    | 0      | —      | 14,4   | —      | 21,3  | —      | 25,8   | —      | 29,4   |
| Родий                               | 0,819               | 1,622 | 3,182  | 4,680  | 6,1    | 7,5    | 8,8   | 10,0   | 11,1   | 12,0   | 12,8   |
| Ртуть* <sup>6</sup>                 | 11,4                | 20,8  | 85,0   | 95,6   | 112,6  | 114,6  | 116,7 | 118,5  | 120,1  | 121,6  | 122,8  |
| Рубидий                             | 52,9                | 62,9  | 62,4   | 48,4   | 30,5   | 7,6    | —21,8 | —59,4  | —97,2  | —138   | —195   |
| Рутений                             | 1,24                | 2,48  | —      | —      | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —      |
| Самарий                             | —                   | 3,6   | 6,1    | 8,2    | 9,5    | 10,5   | 11,2  | 11,8   | 12,3   | 12,6   | 12,8   |
| Свинец                              | 6,8                 | 12,5  | 21,8   | 29,2   | 34,9   | 39,4   | 42,7  | 45,4   | 47,6   | 49,5   | 51,0   |
| Серебро                             | 1,7                 | 3,4   | 6,4    | 9,0    | 11,5   | 13,6   | 15,4  | 16,9   | 18,1   | 19,1   | 19,8   |
| Стронций* <sup>7</sup>              | —24,5               | —55,6 | —137,7 | —246,6 | —358   | —29    | —137  | —89    | —81,5  | —80,5  | —81    |
| Сурьма                              | —                   | —6,0  | —10,4  | —10,3  | —7,8   | —2,1   | 6,2   | 16,3   | 24,4   | 32,6   | 39,5   |
| Сурьма, $\approx \perp C(87^\circ)$ | —2,6                | —4,5  | —4,2   | —4,7   | —      | —      | —     | —      | —      | —      | —      |

| Металл                               | Давление, $10^8$ Па |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                      | 5                   | 10    | 20    | 30    | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  |
| Сурьма ( $41^\circ$ от С)            | -5,5                | -12,6 | -25,6 | -31,5 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| Таллий* <sup>8</sup>                 | 6,38                | 11,80 | 20,5  | 27,3  | 33,5 | 56,4 | 60,9 | 64,8 | 68,1 | 71,0 | 73,5 |
| Тантал                               | 0,811               | 1,621 | 3,196 | 4,650 | 5,9  | 7,1  | 8,2  | 9,2  | 10,2 | 11,0 | 11,8 |
| Титан                                | 0,575               | 1,118 | 2,126 | 3,051 | 3,9  | 4,7  | 5,5  | 6,2  | 6,9  | 7,6  | 8,4  |
| Торий                                | —                   | 3,4   | 6,3   | 8,8   | 10,8 | 12,4 | 13,8 | 15,0 | 16,0 | 16,9 | 17,9 |
| Тулий                                | —                   | 2,6   | 4,7   | 6,4   | 7,7  | 8,7  | 9,6  | 10,3 | 11,2 | 12,1 | 13,1 |
| Уран                                 | 2,355               | 4,56  | 8,634 | 12,31 | 16,3 | 18,8 | 21,0 | 23,0 | 24,8 | 26,3 | 27,6 |
| Хром* <sup>9</sup>                   | 12,45               | 17,33 | 22,56 | 26,88 | 29,9 | 32,7 | 35,3 | 37,6 | 39,9 | 42,0 | 44,2 |
| Цезий* <sup>10</sup>                 | 18,8                | -0,5  | -91,7 | -320  | -496 | -790 | -832 | -655 | -555 | -488 | -433 |
| Церий* <sup>11</sup>                 | -2,0                | 45,2  | 49,4  | 51,3  | 52,3 | 53,1 | 53,8 | 53,7 | 52,9 | 51,4 | 51,8 |
| Цинк                                 | —                   | 6,3   | 11,3  | 15,3  | 18,8 | 21,7 | 24,4 | 26,7 | 28,7 | 30,5 | 32,1 |
| Цинк $\approx \pm$ С ( $87^\circ$ С) | 25                  | 4,8   | 8,5   | 11,4  | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| Цирконий* <sup>12</sup>              | 0,195               | 0,39  | 0,78  | —     | 0,8  | 1,0  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | —    | —    |
| Эрбий                                | —                   | 2,7   | 5,0   | 6,8   | 8,2  | 11,0 | 13,7 | 15,6 | 16,8 | 17,4 | 17,6 |

\*<sup>1</sup> При  $8 \cdot 10^8$  Па скачок от 103,2 до 148,5%.\*<sup>2</sup> При  $24,7 \cdot 10^8$  Па скачок от +51,4 до -76,1%, при  $2,6 \cdot 10^8$  Па скачок от -6,4 до -38,3%.\*<sup>3</sup> Для твердого галлия ( $0^\circ$ С) при  $10^8$  Па  $\Delta R/R_0 = -2,47\%$ .\*<sup>4</sup> Увеличение давления. В обратном ходе гистерезис, при  $2 \cdot 10^8$ ,  $10^8$  и  $5 \cdot 10^8$  Па  $\Delta R/R_0 = -8,4$ ;  $-4,4$ ;  $-1,7\%$ .\*<sup>5</sup> При  $10^8$  Па излом.\*<sup>6</sup> При  $13,59 \cdot 10^8$  Па переход из жидкого состояния в твердое, скачок от -26,2 до 75,3%, при  $4 \cdot 10^8$  Па скачок от -101,7 до -112%.\*<sup>7</sup> При  $4,6 \cdot 10^8$  Па максимум +405%.\*<sup>8</sup> При  $4,5 \cdot 10^8$  Па скачок от -36,1 до 54%.\*<sup>9</sup> При  $3,4 \cdot 10^8$  Па излом,  $\Delta R/R_0 = 9,76\%$ .\*<sup>10</sup> При  $2,207 \cdot 10^8$  Па скачок от 120,3 до 143,9%, при  $5,493 \cdot 10^8$  Па максимум +102%.\*<sup>11</sup> При  $7 \cdot 10^8$  Па скачок от +2,7 до -41,8%.\*<sup>12</sup> Выше  $8 \cdot 10^8$  Па падение сопротивления на 16—17%.

Продолжение табл. 21.8

## 21.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ниже в таблицах и рисунках приводятся данные по сопротивлению металлов, металлов с примесями и сплавов, нашедших практическое применение в электротехнике, приборостроении и других отраслях промышленности.

Таблица 21.8. Удельное сопротивление  $\rho$  и температурный коэффициент  $\alpha$  при  $20^\circ\text{C}$  сплавов, употребляемых до температуры  $t_{\text{max}}$  [1]

| Сплав         | Массовое содержание компонентов, % | $t_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{20}, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ | $\alpha_{20}, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Константан    | 54Cu, 45Ni, 1Mn                    | 400                              | 50                                              | -3                                    |
|               | 86Cu, 12Mn, 2Ni                    | 300                              | 43                                              | -2                                    |
|               | 85Cu, 15Mn                         | 300                              | 51                                              | 0,8                                   |
|               | 84Cu, 13Mn, 3Al                    | 400                              | 50                                              | -0,2 ÷ -2                             |
|               | 85Cu, 9,5Mn, 5,5Al                 | 400                              | 45                                              | -3                                    |
| Медь-алюминий | 95Cu, 5Al                          | 350                              | 11                                              | 80                                    |
| Медь-марганец | 91Cu, 9Mn                          | 350                              | 33,4                                            | -0,8                                  |
|               | 90,5Cu, 9,5Mn                      | 350                              | 35,2                                            | 9,1                                   |

Таблица 21.9. Удельное сопротивление при  $20^\circ\text{C}$  и  $1000^\circ\text{C}$  сплавов, употребляемых до температуры  $t_{\text{max}}$  [1]

| Сплав            | Массовое содержание компонентов | $t_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{20}, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ | $\rho_{1000}, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ |
|------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Нихром           | 70—80Ni, 20Cr, 0—2Mn            | 1150                             | 106                                             | 112                                               |
|                  | 70Ni, 8Fe, 20Cr, 2Mn            | 1150                             | 110                                             | 120                                               |
|                  | 62Ni, 23Fe, 15Cr                | 1100                             | 110                                             | 119                                               |
|                  | 63Ni, 20Fe, 15Cr, 2Mn           | 1150                             | 112                                             | 125                                               |
|                  | 20Ni, 55Fe, 25Cr                | 1000                             | 97                                              | 130                                               |
|                  | 65Fe, 30Cr, 5Al                 | 1350                             | 140                                             | 142                                               |
| Хромоалюминиевый | 72Fe, 20Cr, 5Al, 3Co            | 1300                             | 145                                             | 151                                               |
|                  | 86Fe, 12Cr, 2Al                 | 1000                             | 110                                             | 122                                               |

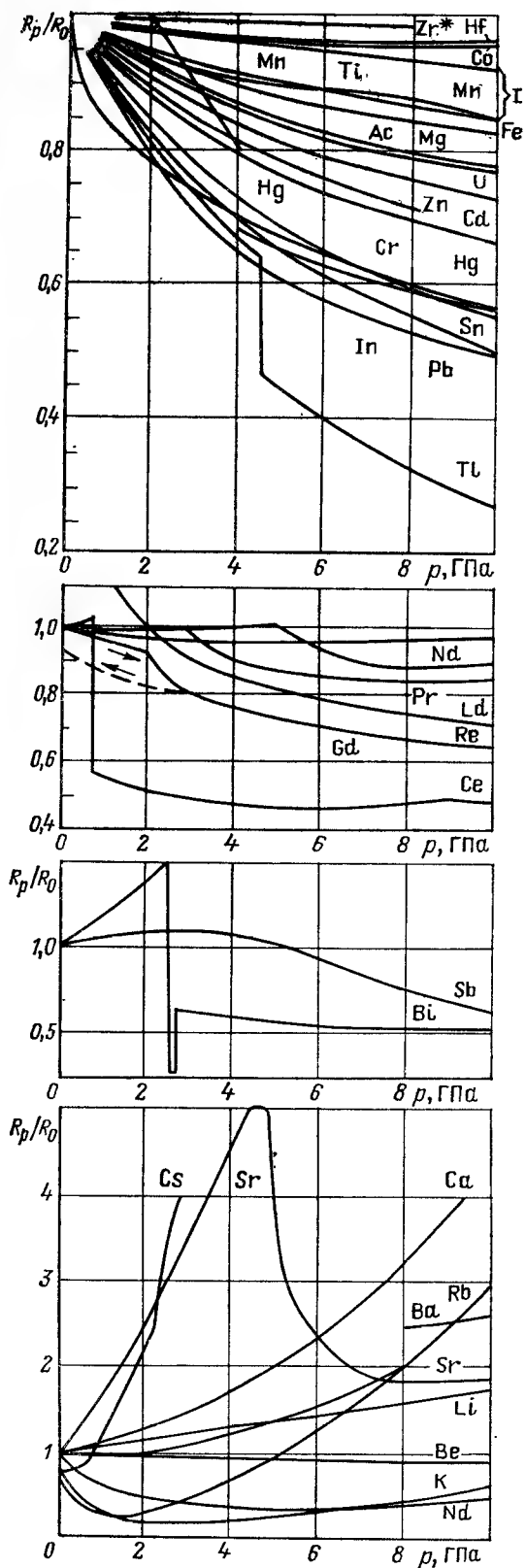


Рис. 21.3. Влияние давления на относительное сопротивление металлов [4]

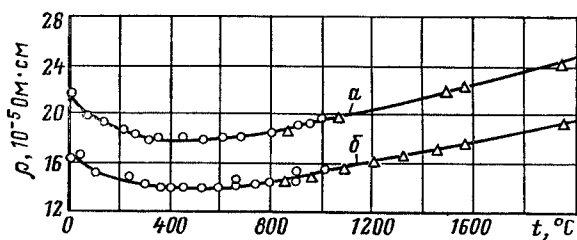


Рис. 21.4. Зависимость удельного сопротивления электролитного графита от температуры [10] поперек (а) и вдоль (б) направления прессования

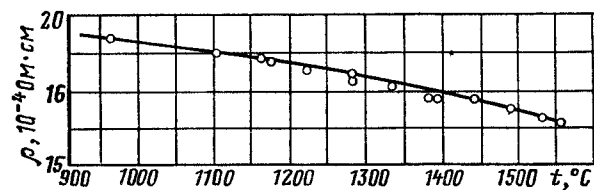


Рис. 21.5. Зависимость удельного сопротивления угольного материала из нефтяного кокса выше температуры отжига от температуры [10]

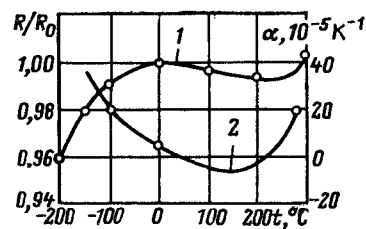


Рис. 21.6. Зависимость относительного сопротивления (1) и температурного коэффициента (2) марганца от температуры [11]

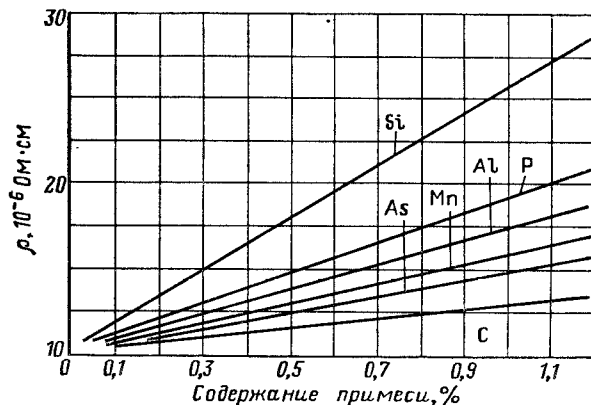


Рис. 21.7. Зависимость удельного сопротивления стали от содержания примесей [11]

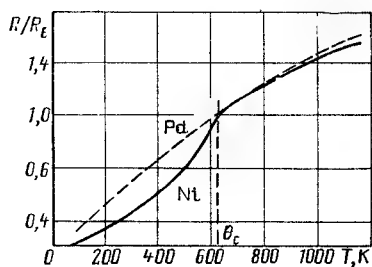


Рис. 21.8. Зависимость относительного сопротивления никеля и палладия от температуры. Сопротивление нормировано на точку Кюри для никеля (631 К) [4]

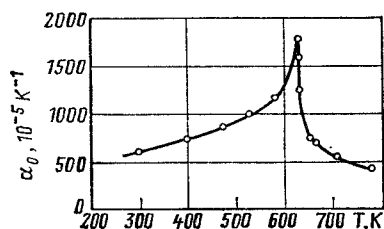


Рис. 21.9. Зависимость температурного коэффициента сопротивления никеля от температуры [4]

Таблица 21.10. Удельное сопротивление  $\rho$  и температурный коэффициент  $\alpha$  при 20 °С некоторых сплавов [1]

| Сплав             | Массовое содержание компонентов, % | $\rho_{20}^*$ , $10^{-6}$ Ом·см | $10^{-5} \alpha_{20}^*$ , K <sup>-1</sup> |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| Алюмель           | 2Mn, 2Al, 1Si, Ni, остальное Co    | 305                             | —                                         |
| Розé              | 48Bi, 28Pb, 24Sn                   | 67                              | 190                                       |
| Вуда              | 56Bi, 14Pb, 14Sn, 16Cd             | 54                              | 230                                       |
|                   | 64Fe, 36Ni                         | 75                              | —                                         |
|                   | 90Fe, 10Al                         | 100                             | 327                                       |
|                   | 88Fe, 12Mn                         | 55                              | ≈200                                      |
|                   | 96Fe, 4Si                          | 50                              | ≈90                                       |
| Копель            | 44Ni+Co, 0,1—1Mn, остальное Cu     | 465                             | —                                         |
| Монель            | 67Ni, 28Cu, остальное Fe+Mn        | 48                              | ≈120                                      |
| Пермаллой С       | 70—75Ni, остальное Fe+Cu+Cr        | 55                              | —                                         |
| Платиноиридиевый  | 90Pt, 10Ir                         | 23,6                            | 123                                       |
|                   | 85Pt, 15Ir                         | 27,4                            | 100                                       |
|                   | 80Pt, 20Ir                         | 30                              | 80                                        |
| Платинородиевый   | 90Pt, 10Rh                         | 21,7                            | 139                                       |
| Платиносеребряный | 33Pt, 67Ag                         | 27                              | 24                                        |

Рис. 21.10. Влияние примесей на удельное сопротивление серебра [11]

Таблица 21.11. Проводимость проводниковых бронз при 20 °С [11, 12]

| Сплав                                                                                                                                                                               | Состояние              | Проводимость, % по отношению к меди |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Бронза*:<br>кадмевая (0,9% Cd)<br>оловянная (0,8% Cd, 0,6% Sn)<br>алюминиевая (2,5% Al, 2% Sn)<br>бериллиевая (2,25% Be)<br>фосфористая (7% Sn, 0,1% P)<br>Медь хромистая (0,5% Cr) | Отожженная             | 95                                  |
|                                                                                                                                                                                     | Твердотяннутая         | 83—90                               |
|                                                                                                                                                                                     | Отожженная             | 55—60                               |
|                                                                                                                                                                                     | Твердотяннутая         | 50—55                               |
|                                                                                                                                                                                     | Отожженная             | 15—18                               |
|                                                                                                                                                                                     | Твердотяннутая         | 15—18                               |
|                                                                                                                                                                                     | Отожженная             | 17                                  |
|                                                                                                                                                                                     | Состаренная при 350 °С | 30                                  |
|                                                                                                                                                                                     | Отожженная             | 10—15                               |
|                                                                                                                                                                                     | Твердотяннутая         | 10—15                               |
|                                                                                                                                                                                     | Состаренная            | 80—85                               |

\* Остальное у всех бронз — медь.

Таблица 21.12. Электрические свойства латуней различных марок при 20 °С [11]

| Сплав                           | Марка, состав, % (остальное медь) | $\rho$ , $10^{-6}$ Ом·см | $\alpha$ , $10^{-5}$ K <sup>-1</sup> |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| Томпак                          | Л-96, Zn4                         | 4,3                      | 2,7                                  |
| Латунь                          | Л-62, Zn38                        | 7,1                      | 1,7                                  |
| Латунь железисто-марганцовистая | ЛЖ Мц 59-1,1 Fe 11, Mn 0,8        | 8,9                      | 1,8                                  |
| Латунь марганцовистая           | ЛМц 58-2 Mn 2, Zn 40              | 21,2                     | 1,3                                  |
| Латунь свинцовистая             | ЛС 59-1 Pb1, Zn 40                | 6,5                      | 1,7                                  |

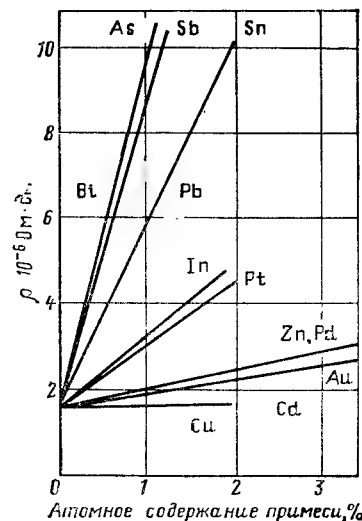


Таблица 21.13. Удельное сопротивление чугуна и составляющих его компонентов при 20 °С [13]

| Сорт<br>(компонент)<br>чугуна | Чугун                |             |             | Компонент чугуна |             |               |                |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|---------------|----------------|
|                               | Серый                | Ковкий      | Белый       | Фер-<br>рит      | Пер-<br>лит | Цемен-<br>тит | Гра-<br>фит    |
| $\rho$ ,<br>$10^{-6}$ Ом · см | $80 \pm$<br>$\pm 40$ | $50 \pm 20$ | $70 \pm 20$ | 10,4             | 20          | 140           | $150 -$<br>300 |

Таблица 21.14. Удельное сопротивление нержавеющей сталей при 20 °С [14]

| Марка<br>стали                | 3X13 | X17 | 1X18H9,<br>2X18H9,<br>1X18H9T | X25C3H | X18H25C2 | X20H14C2 | X10C2M |
|-------------------------------|------|-----|-------------------------------|--------|----------|----------|--------|
| $\rho$ ,<br>$10^{-6}$ Ом · см | 5,7  | 6,5 | 7,5                           | 8,0    | 10,2     | 9,5      | 7,5    |

Таблица 21.16. Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной танталовой нити\* [11].

Обозначения:  $T$  — истинная температура;  
 $R$  — сопротивление;  $W$  — мощность накала;  $I$  — ток;  
 $I_0$  — ток эмиссии

| $T$ , К | $R$ , $10^{-6}$ Ом | $W$ , Вт | $U$ , В | $I$ , А | $I_0$ , А/см         |
|---------|--------------------|----------|---------|---------|----------------------|
| 300     | 17,65              | —        | —       | —       | —                    |
| 1000    | 56,2               | 2,495    | 0,0118  | 211     | —                    |
| 1100    | 60,2               | 3,87     | 0,0152  | 254     | —                    |
| 1200    | 64,8               | 5,78     | 0,0193  | 299     | —                    |
| 1300    | 69,7               | 8,58     | 0,0244  | 352     | —                    |
| 1400    | 74,0               | 12,42    | 0,0304  | 408     | —                    |
| 1500    | 79,3               | 17,2     | 0,0368  | 469     | —                    |
| 1600    | 83,7               | 23,3     | 0,0438  | 528     | $4,4 \cdot 10^{-5}$  |
| 1700    | 88,1               | 31,7     | 0,0527  | 602     | $3,14 \cdot 10^{-4}$ |
| 1800    | 92,2               | 41,7     | 0,0617  | 676     | $1,57 \cdot 10^{-3}$ |
| 1900    | 96,4               | 53,8     | 0,0716  | 751     | $6,28 \cdot 10^{-3}$ |
| 2000    | 100,3              | 68,0     | 0,0821  | 828     | $2,8 \cdot 10^{-2}$  |
| 2100    | 104,3              | 85,2     | 0,0936  | 910     | $8,8 \cdot 10^{-2}$  |
| 2200    | 108,3              | 107,5    | 0,1072  | 1002    | $2,7 \cdot 10^{-1}$  |
| 2300    | 112,4              | 132,9    | 0,1212  | 1095    | $7,85 \cdot 10^{-1}$ |
| 2400    | 116,2              | 161,3    | 0,1357  | 1189    | 2,04                 |
| 2500    | 120,1              | 196,2    | 0,1522  | 1288    | 4,4                  |
| 2600    | 124,0              | 236,8    | 0,1699  | 1394    | —                    |
| 2700    | 127,6              | 282,8    | 0,1880  | 1502    | —                    |
| 2800    | 131,0              | 332,0    | 0,2064  | 1606    | —                    |
| 2900    | 134,5              | 387,0    | 0,2257  | 1715    | —                    |
| 3000    | 138,5              | 454,0    | 0,2479  | 1830    | —                    |
| 3100    | 142,0              | 526,0    | 0,2700  | 1948    | —                    |
| 3200    | 145,0              | 611,0    | 0,2940  | 2075    | —                    |
| 3269    | 147,0              | 674,0    | 0,3110  | 2164    | —                    |

\* См. сноску к табл. 21.15.

Таблица 21.15. Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной молибденовой нити\* [11]

Обозначения:  $R$  — сопротивление;  $W$  — мощность накала;  
 $U$  — напряжение;  $I$  — ток

| $T$ , К | $R$ , $10^{-6}$ Ом | $W$ , Вт | $U$ , $10^{-3}$ В | $I$ , А |
|---------|--------------------|----------|-------------------|---------|
| 273     | 6,85               | —        | —                 | —       |
| 300     | 7,36               | —        | —                 | —       |
| 400     | 10,36              | —        | —                 | —       |
| 1000    | 30,4               | 1,73     | 7,24              | 248,5   |
| 1200    | 36,9               | 4,5      | 12,9              | 349,0   |
| 1400    | 44,6               | 10,0     | 21,1              | 473,0   |
| 1600    | 52,4               | 19,8     | 32,2              | 614,0   |
| 1800    | 59,8               | 35,5     | 46,1              | 772,0   |
| 2000    | 69,6               | 60,3     | 64,8              | 816,0   |
| 2200    | 75,4               | 96,5     | 85,2              | 1130,0  |
| 2400    | 83,3               | 147,8    | 111,0             | 1330,0  |
| 2600    | 91,8               | 218,5    | 141,4             | 1547,0  |
| 2800    | 99,8               | 304,0    | 174,0             | 1745,0  |
| 2895    | 103,4              | 364,4    | 194,0             | 1875,0  |

\* Нить бесконечна в смысле отсутствия продольного тепло-  
отвода. При пересчете к диаметру  $d$  (см)  $R$  делится на  $d^2$ ,  
 $W$  умножается на  $d$ ,  $U$  делится на  $\sqrt{d}$ ,  $I$  умножается на  $\sqrt{d^3}$ .

Таблица 21.17. Свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной вольфрамовой нити\* [5, 11]

Обозначения:  $T_{я}$  — яркостная температура, остальные  
обозначения см. в табл. 21.16

| $T$ , К | $T_{я}$ , К | $R$ ,<br>$10^{-6}$ Ом | $W$ , Вт | $U$ ,<br>$10^{-3}$ В | $I$ , А | $I_0$ , А/см*2        |
|---------|-------------|-----------------------|----------|----------------------|---------|-----------------------|
| 273     | —           | 6,37                  | —        | —                    | —       | —                     |
| 293     | —           | 6,99                  | —        | —                    | —       | —                     |
| 300     | —           | 7,20                  | —        | —                    | —       | —                     |
| 400     | —           | 10,26                 | 0,0062   | 0,253                | 24,67   | —                     |
| 500     | —           | 13,45                 | 0,0305   | 0,64                 | 47,62   | —                     |
| 600     | —           | 16,85                 | 0,0954   | 1,268                | 75,25   | —                     |
| 700     | —           | 20,49                 | 0,240    | 2,218                | 108,2   | —                     |
| 800     | —           | 24,19                 | 0,530    | 3,581                | 148,0   | —                     |
| 900     | —           | 27,94                 | 1,041    | 5,393                | 193,1   | —                     |
| 1000    | 966         | 31,74                 | 1,891    | 7,749                | 244,1   | $3,35 \cdot 10^{-15}$ |
| 1100    | 1058        | 35,58                 | 3,223    | 10,71                | 301,0   | $4,77 \cdot 10^{-13}$ |
| 1200    | 1149        | 39,46                 | 5,210    | 14,34                | 363,4   | $3,06 \cdot 10^{-11}$ |
| 1300    | 1240        | 43,40                 | 8,060    | 18,70                | 430,9   | $1,01 \cdot 10^{-9}$  |
| 1400    | 1330        | 47,37                 | 12,01    | 23,85                | 503,5   | $2,08 \cdot 10^{-8}$  |
| 1500    | 1420        | 51,40                 | 17,33    | 29,85                | 580,6   | $2,87 \cdot 10^{-7}$  |
| 1600    | 1509        | 55,46                 | 24,32    | 36,73                | 662,2   | $2,91 \cdot 10^{-8}$  |
| 1700    | 1597        | 59,58                 | 33,28    | 44,52                | 747,3   | $2,22 \cdot 10^{-5}$  |
| 1800    | 1684        | 63,74                 | 44,54    | 53,28                | 836,0   | $1,4 \cdot 10^{-4}$   |
| 1900    | 1771        | 67,94                 | 58,45    | 63,02                | 927,4   | $7,15 \cdot 10^{-4}$  |
| 2000    | 1857        | 72,19                 | 75,37    | 73,75                | 1022    | $3,15 \cdot 10^{-3}$  |

| $T, K$ | $T_{я}, K$ | $R_c, 10^{-6} \text{ Ом}$ | $W, \text{ Вт}$ | $U_c, 10^{-6} \text{ В}$ | $I, A$ | $I_0, A/\text{см}$   |
|--------|------------|---------------------------|-----------------|--------------------------|--------|----------------------|
| 2100   | 1943       | 76,49                     | 95,69           | 85,57                    | 1119   | $7,23 \cdot 10^{-2}$ |
| 2200   | 2026       | 80,83                     | 119,8           | 98,40                    | 1217   | $4,17 \cdot 10^{-2}$ |
| 2300   | 2109       | 85,22                     | 148,2           | 112,4                    | 1310   | $1,28 \cdot 10^{-1}$ |
| 2400   | 2192       | 89,65                     | 181,2           | 127,5                    | 1422   | 0,364                |
| 2500   | 2274       | 94,13                     | 219,3           | 143,6                    | 1526   | 0,935                |
| 2600   | 2356       | 98,66                     | 263,0           | 161,1                    | 1632   | 2,25                 |
| 2700   | 2437       | 103,22                    | 312,7           | 179,7                    | 1741   | 5,12                 |
| 2800   | 2516       | 107,85                    | 368,9           | 199,5                    | 1849   | 11,11                |
| 2900   | 2595       | 112,51                    | 432,4           | 220,6                    | 1961   | 22,95                |
| 3000   | 2673       | 117,24                    | 503,5           | 243,0                    | 2072   | 44,4                 |
| 3100   | 2750       | 121,95                    | 583,0           | 266,7                    | 2187   | 83,0                 |
| 3200   | 2827       | 126,76                    | 671,5           | 291,7                    | 2301   | 150,2                |
| 3300   | 2903       | 131,60                    | 769,7           | 318,3                    | 2418   | 265,2                |
| 3400   | 2978       | 136,49                    | 878,3           | 346,2                    | 2537   | 446,0                |
| 3500   | 3053       | 141,42                    | 998,0           | 375,7                    | 2657   | 732,0                |
| 3600   | —          | 146,40                    | 1130            | 406,7                    | 2777   | 1173                 |
| 3655   | 3165       | 149,15                    | 1202            | 423,4                    | 2838   | 1505                 |

\*1 См. сноску к табл. 21.15.

\*2  $I_0$  нормировано на единицу длины нити диаметром 1 см, а не на единицу площади.Таблица 21.18. Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_0 = \rho^{-1} \cdot d\rho/dT$  рения [15]

| $t, ^\circ C$ | $10^{-8} \rho, \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $\alpha_0, 1,0^{-3} K^{-1}$ | $t, ^\circ C$ | $10^{-8} \rho, \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $1,0^{-3} \alpha_0, K^{-1}$ |
|---------------|------------------------------------------|-----------------------------|---------------|------------------------------------------|-----------------------------|
| —253          | 0,015                                    | —                           | 900           | 72,5                                     | 3,13                        |
| —200          | 2,3                                      | —                           | 1100          | 80,5                                     | 2,94                        |
| —100          | 10                                       | —                           | 1300          | 87,0                                     | 2,78                        |
| 0             | 17,5                                     | —                           | 1500          | 93,0                                     | 2,58                        |
| 20            | 19,3                                     | —                           | 1700          | 98,5                                     | 2,44                        |
| 100           | 25,4                                     | 3,95                        | 1900          | 103,0                                    | 2,31                        |
| 300           | 40,0                                     | 3,83                        | 2100          | 106,5                                    | 2,17                        |
| 500           | 52,0                                     | 3,58                        | 2300          | 109,0                                    | 2,04                        |
| 700           | 63,0                                     | 3,33                        |               |                                          |                             |

Таблица 21.19. Зависимость удельного сопротивления сплавов вольфрама и рения от температуры [15]

| 4,75% Re |                                          | 21% Re |                                          | 27% Re |                                          |
|----------|------------------------------------------|--------|------------------------------------------|--------|------------------------------------------|
| $T, K$   | $10^{-6} \rho, \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $T, K$ | $\rho, 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ | $T, K$ | $\rho, 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ |
| 300      | 10,4                                     | 30     | 24,2                                     | 1400   | 67,3                                     |
| 630      | 20,4                                     | 550    | 34,0                                     | 1600   | 73,9                                     |
| 850      | 27,3                                     | 810    | 42,0                                     | 1800   | 79,9                                     |
| 1020     | 32,4                                     | 980    | 47,0                                     | 2000   | 85,7                                     |
| 1160     | 36,7                                     | 1120   | 51,6                                     | 2400   | 91,1                                     |
| 1270     | 40,0                                     | 1250   | 54,6                                     | 2600   | 96,8                                     |
| 1370     | 43,2                                     | 1360   | 57,4                                     | 2800   | 102,8                                    |
| 1465     | 45,9                                     | 1460   | 59,8                                     | 3000   | 109,2                                    |
| 1540     | 48,5                                     | 1540   | 62,6                                     |        |                                          |
|          |                                          | 1610   | 64,4                                     |        |                                          |

## 21.5. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводимость — квантовое явление, возникающее вследствие Бозе-конденсации пар электронов проводимости. Двумя важнейшими макроскопическими признаками возникновения сверхпроводящего состояния являются: 1) отсутствие сопротивления протекающему постоянному электрическому току при температуре ниже некоторой критической  $T_c$ , 2) выталкивание магнитного поля из объема сверхпроводника (эффект Мейснера). Существуют критическое магнитное поле  $H_c$  и критическая плотность тока  $j_c$ , при превышении которых сверхпроводимость исчезает. Зависимость критической напряженности магнитного поля от температуры с хорошей точностью описывается формулой

$$H_c(T) = H_{c0} [1 - (T/T_c)^2], \quad (21.8)$$

где  $T$  — абсолютная температура;  $H_{c0}$  — критическая напряженность магнитного поля при нулевой температуре.

Электроны проводимости металла объединяются в пары благодаря электрон-фононному взаимодействию, вследствие чего сверхпроводимость оказывается чувствительной к свойствам кристаллической решетки. Разные кристаллические модификации одного и того же вещества имеют различную критическую температуру,  $T_c$  зависит от внешнего давления  $P$ .

К микроскопическим характеристикам сверхпроводника относятся характерный размер пары электронов  $\xi_0$  и глубина проникновения магнитного поля  $\lambda$ .

Большинство сверхпроводящих сплавов относится к так называемым сверхпроводникам II рода, в которых возможно сосуществование сверхпроводимости и магнитного поля (фаза Шубникова). Магнитное поле вызывает появление в объеме таких сверхпроводников тонких нитей нормального металла (вихрей Абрикосова) с характерным размером  $\sim \lambda$ , каждая из которых несет квант магнитного потока  $\Phi_0 = h c / 2e$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $e$  — заряд электрона. В связи с тем, что в сверхпроводниках II рода нет полного эффекта Мейснера, в них сверхпроводимость существует при гораздо более высоких значениях напряженности магнитных полей  $H_{c2}$ .

Различные характеристики сверхпроводников представлены в табл. 21.20—21.25 и на рис. 21.11.

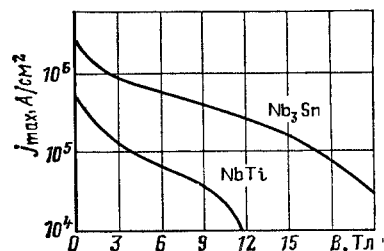


Рис. 21.11. Зависимость критической плотности тока от индукции магнитного поля при 4,2 К [22]

Таблица 21.20. Сверхпроводимость элементов  
(массивные образцы при атмосферном давлении)

| Элемент | Кристаллическая структура*         | $T_c$ , К [16]       | $H_{c0}$ , Э [16] | $dT_c/dP$ , $10^{-11}$ К/Па [17] |
|---------|------------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------|
| Al      | Алюминий ГЦК                       | 1,1796* <sup>2</sup> | 104,9             | —25,5                            |
| Be      | Бериллий Гекс.                     | 0,0237* <sup>2</sup> | —                 | —                                |
| Cd      | Кадмий Гекс.                       | 0,519* <sup>2</sup>  | 29,6              | —18,2                            |
| Ga      | Галлий Ромб.                       | 1,091                | 58,9              | —18                              |
| Hf      | Гафний Гекс.                       | 0,015?               | —                 | —                                |
| Hg      | Ртуть $\alpha$ $\beta$ $\gamma$    | 4,153                | 390               | —36,6                            |
|         |                                    | 3,95                 | 340               | —47,5                            |
|         |                                    | 3,74                 | —                 | —                                |
| In      | Индий Тетр.                        | 3,4145* <sup>2</sup> | 289               | —39,1                            |
| Ir      | Иридий ГЦК                         | 0,100* <sup>2</sup>  | 20,1              | —0,5                             |
| La      | Лантан $\alpha$ $\beta$            | 4,88                 | 808               | 190                              |
|         |                                    | 6,0                  | 1096              | 113                              |
| Lu      | Лютеций Гекс.                      | 0,1                  | —                 | —                                |
| Mg      | Магний Гекс.                       | 0,0005               | —                 | —                                |
| Mo      | Молибден ОЦК                       | 0,92                 | 98                | —1                               |
| Nb      | Ниобий ОЦК                         | 9,3* <sup>2</sup>    | 1980              | 0                                |
| Os      | Осмий Гекс.                        | 0,66                 | 65                | —1,8                             |
| Pa      | Протактиний ОЦК                    | 1,4                  | —                 | —                                |
| Pb      | Свинец ГЦК                         | 7,1999* <sup>2</sup> | 803,4             | —38,6                            |
| Re      | Рений Гекс.                        | 1,698                | 198               | —2                               |
| Rh      | Родий ГЦК                          | 0,002?               | —                 | —                                |
| Ru      | Рутений Гекс.                      | 0,493                | 47                | 0                                |
| Sn      | Олово Тетр.                        | 3,722                | 308               | —46,3                            |
| Ta      | Тантал ОЦК                         | 4,46                 | 831               | —2,6                             |
| Th      | Торий ГЦК                          | 1,374                | 162               | —17                              |
| Ti      | Титан $\alpha$ $\beta$             | 0,42                 | 56                | 5,5                              |
|         |                                    | 5?                   | —                 | —                                |
| Tl      | Таллий Гекс.                       | 2,38                 | 179,5             | —23                              |
| Tc      | Технеций Гекс.                     | 7,8* <sup>2</sup>    | 1410              | —12,5                            |
| U       | Уран Ромб.                         | 1,8                  | —                 | —                                |
| V       | Ванадий ОЦК                        | 5,46                 | 1167              | 11                               |
| W       | Вольфрам ОЦК                       | 0,015* <sup>2</sup>  | 1,07              | —                                |
| Zn      | Цинк Гекс.                         | 0,851* <sup>2</sup>  | 52                | —25                              |
|         |                                    | 0,53                 | 47,7              | 14                               |
|         |                                    | 1,5                  | —                 | —                                |
| Zr      | Цирконий $\alpha$ $\beta$ $\omega$ | 0,72                 | —                 | —                                |

\*1 ГЦК — гранецентрированная кубическая; ОЦК — объемноцентрированная кубическая; тетр. — тетрагональная; гекс. — гексагональная; ромб. — ромбическая.

\*2 Значения критической температуры, рекомендованные в качестве реперных точек [19—21].

Таблица 21.21. Сверхпроводимость элементов под давлением [16]

| Элемент | $T_c^{\max}$ , К | $P$ , $10^8$ Па   | $dT_c/dP$ , $10^{-11}$ К/Па |
|---------|------------------|-------------------|-----------------------------|
| As II   | 0,25             | 100               | —                           |
| As III  | 0,5              | 140               | —                           |
| Ba II   | 3,2              | 83                | 1000                        |
| Ba III  | 3,0              | 88                | —150                        |
| Ba IV   | 5,3              | 200* <sup>1</sup> | 13                          |
| Bi II   | 3,916            | 25                | —                           |
| Bi II   | 8,2              | 25                | —32                         |
| Bi III  | 7,25             | 27                | —40                         |
| Bi IV   | 7,0              | 43                | —46                         |
| Bi V    | 6,7              | 68                | —30                         |

Продолжение табл. 21.21

| Элемент      | $T_c^{\max}$ , К | $P$ , $10^8$ Па   | $dT_c/dP$ , $10^{-11}$ К/Па |
|--------------|------------------|-------------------|-----------------------------|
| Bi VI        | 8,55             | 80                | —23                         |
| Ce           | 1,7              | 50                | —                           |
| Cs V         | 1,6              | 125               | —                           |
| Ga II        | 6,24             | 20                | —30                         |
| Ge           | 5,35             | 115               | —                           |
| Hf           | 0,24             | 160* <sup>1</sup> | —                           |
| $\alpha$ -La | 8,2              | 23                | 140                         |
| $\beta$ -La  | 12               | 250* <sup>1</sup> | —                           |
| Lu           | 0,7              | 150* <sup>1</sup> | —                           |
| P            | 5,8              | 170               | —                           |
| Pb II        | 3,6              | 160               | —2,2                        |
| Sb           | 3,55             | 85                | —                           |
| Se           | 6,9              | 130* <sup>1</sup> | —                           |
| Si           | 7,1              | 120               | —                           |
| Sn II        | 5,3              | 113               | —49,5                       |
| Te II        | 4,2              | 70                | 80                          |
| Te III       | 4,3              | 70                | —10                         |
| Te IV        | 4,3              | 80                | —42                         |
| Tl II        | 2,395            | 2                 | —10                         |
| Tl III       | 1,45             | 35                | —49,5                       |
| Tl IV        | 2,32             | 40                | —20                         |
| $\alpha$ -U  | 2,1              | 10                | —                           |
| $\beta$ -U   | 1,15             | 9,5               | —                           |
| Y            | 2,7              | 170               | —                           |
| $\alpha$ -Zr | 0,69             | 45                | 3,5                         |

\*1 Максимальное давление, достигнутое в эксперименте.

Таблица 21.22. Сверхпроводимость элементов в пленках [16]

| Элемент      | $T_c^{\max}$ , К | Элемент      | $T_c^{\max}$ , К |
|--------------|------------------|--------------|------------------|
| Al           | 5,8              | Nb           | 10,0             |
| Be           | 9,6              | Re           | 7                |
| Bi           | 8                | Sn           | 6,0              |
| Cd           | 0,9              | Ta           | 4,51             |
| Cr           | 1,52             | $\alpha$ -Ti | 1,3              |
| Ga           | 8,5              | Tl           | 3,15             |
| $\alpha$ -Hf | 1,3              | V            | 6,02             |
| In           | 7                | W            | 4,55             |
| $\beta$ -La  | 6,74             | Zn           | 1,9              |
| Mo           | 6,7              |              |                  |

Таблица 21.23. Микроскопические параметры некоторых сверхпроводников [18]

| Элемент | $\xi_0$ , нм | $\lambda$ , нм |
|---------|--------------|----------------|
| Al      | 1600—1360    | 16—50          |
| Cd      | 760          | 110            |
| Hg      | —            | 38—45          |
| In      | 354—240      | 64—39          |
| Nb      | 38           | 39             |
| Pb      | 96—51        | 39—63          |
| Sn      | 300—100      | 34—75          |
| Tl      | 420          |                |



Таблица 21.24. Сверхпроводимость бинарных соединений [16]

Продолжение табл. 21.24

| Состав                          | $T_c$ , К       | Состав             | $T_c$ , К |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|-----------|
| <i>Кубическая структура A15</i> |                 |                    |           |
| Ti <sub>3</sub> Ir              | 4,63—5,40       | Nb <sub>3</sub> Os | 1,05—0,94 |
| Ti <sub>3</sub> Pt              | 0,48—0,58       | Nb <sub>3</sub> Pb | 9,6       |
| Ti <sub>3</sub> Sb              | 6,5—5,7         | Nb <sub>3</sub> Pt | 10,9—8,18 |
| Zr <sub>3</sub> Au              | 0,92            | Nb <sub>3</sub> Rh | 2,64—2,4  |
| Zr <sub>3</sub> Pb              | 0,76            | Nb <sub>3</sub> Sb | 1,9—0,4   |
| Zr <sub>3</sub> Sn              | 0,94—0,76       | Nb <sub>3</sub> Sn | 18,1—18,5 |
| V <sub>3</sub> Al               | 11,65           | Ta <sub>3</sub> Au | 0,51—10   |
| V <sub>3</sub> Au               | 3,15—2,97       | Ta <sub>3</sub> Pb | 17,0      |
| V <sub>3</sub> Ga               | 14,6—16,8       | Ta <sub>3</sub> Pt | 0,40      |
| V <sub>3</sub> Ge               | 6,3             | Ta <sub>3</sub> Sb | 0,72—0,59 |
| V <sub>3</sub> In               | 13,9            | Ta <sub>3</sub> Sn | 6,4       |
| V <sub>3</sub> Ir               | 1,71            | Cr <sub>3</sub> Ir | 0,83      |
| VOs                             | 5,15—4,49       | Cr <sub>3</sub> Os | 4,25—4,03 |
| V <sub>3</sub> Pd               | 0,082           | Cr <sub>3</sub> Rh | 0,072     |
| V <sub>3</sub> Pt               | 3,27—3,20       | Cr <sub>3</sub> Ru | 3,43      |
| V <sub>3</sub> Sb               | 0,80            | Mo <sub>3</sub> Al | 0,58      |
| V <sub>3</sub> Si               | 17,2—17,0       | Mo <sub>3</sub> Ga | 0,76      |
| V <sub>3</sub> Sn               | 7—3,8           | Mo <sub>3</sub> Ge | 1,43      |
| Nb <sub>3</sub> Al              | 18,5—18,8       | Mo <sub>3</sub> Ir | 9,6       |
| Nb <sub>3</sub> Au              | 10,6—11,5       | Mo <sub>3</sub> O  | 4—6,7     |
| Nb <sub>3</sub> Bi              | 3,05            | Mo <sub>3</sub> Os | 11,76     |
| Nb <sub>3</sub> Ga              | 14,5            | Mo <sub>4</sub> Pt | 4,53—5,6  |
| Nb <sub>3</sub> Ge              | 6,9             | Mo <sub>3</sub> Re | 15        |
|                                 | (23,2 в пленке) | Mo <sub>3</sub> Si | 1,34      |
| Nb <sub>3</sub> In              | 9,2             | Mo <sub>3</sub> Tc | 13,5—14   |
| Nb <sub>3</sub> Ir              | 1,76—1,63       | W <sub>3</sub> O   | 0,4—3,35  |

*Кубическая лавес-фаза C15*

|                   |      |                           |           |
|-------------------|------|---------------------------|-----------|
| Barh <sub>3</sub> | 6,0  | PbAu <sub>2</sub>         | 1,18      |
| BiAu <sub>2</sub> | 1,84 | RbBi <sub>2</sub>         | 4,25      |
| CaIr <sub>2</sub> | 6,15 | RhHf <sub>2</sub>         | 1,98      |
| CaRh <sub>2</sub> | 6,40 | ScIr <sub>2</sub>         | 2,46      |
| CeCo <sub>2</sub> | 1,5  | ScRu <sub>2</sub>         | 2,24      |
| CeRu <sub>2</sub> | 6,20 | SrIr <sub>2</sub>         | 5,7       |
| CsBi <sub>2</sub> | 4,75 | SrPt <sub>2</sub>         | 0,7       |
| HfMo <sub>2</sub> | 0,07 | SrRh <sub>2</sub>         | 6,2       |
| HfV <sub>2</sub>  | 9,4  | ThIr <sub>2</sub>         | 6,50      |
| KBi <sub>2</sub>  | 3,58 | ThRu <sub>2</sub>         | 3,56      |
| LaAl <sub>2</sub> | 3,24 | YIr <sub>2</sub>          | 2,18      |
| LaIr <sub>2</sub> | 0,48 | YPt <sub>2</sub>          | 1,70      |
| LaOs <sub>2</sub> | 6,5  | YRh <sub>3</sub>          | 1,07      |
| LaRu <sub>2</sub> | 4,1  | ZrIr <sub>2</sub>         | 4,10      |
| LaPt <sub>2</sub> | 0,54 | ZrV <sub>2</sub>          | 8,8       |
| LuIr <sub>2</sub> | 2,89 | ZrW <sub>2</sub>          | 2,7       |
| LuRh <sub>2</sub> | 1,27 | CaAu <sub>5</sub> (C 15b) | 0,34—0,38 |
| NbBe <sub>2</sub> | 2,15 |                           |           |

| Состав                               | $T_c$ , К | Состав            | $T_c$ , К |
|--------------------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| <i>Гексагональная лавес-фаза C14</i> |           |                   |           |
| HfOs <sub>2</sub>                    | 2,69      | ThRu <sub>2</sub> | 5,05      |
| HfRe <sub>2</sub>                    | 5,61      | ThTe <sub>2</sub> | 5,3       |
| HfTe <sub>2</sub>                    | 5,6       | YOs <sub>2</sub>  | 4,7       |
| LuOs <sub>2</sub>                    | 3,49      | YRe <sub>2</sub>  | 1,83      |
| LuRu <sub>2</sub>                    | 0,86      | YRu <sub>2</sub>  | 2,42      |
| ScOs <sub>2</sub>                    | 4,60      | ZrOs <sub>2</sub> | 3,0       |
| ScRe <sub>2</sub>                    | 4,2       | ZrRe <sub>2</sub> | 6,8       |
| ScRu <sub>2</sub>                    | 2,24      | ZrRu <sub>2</sub> | 1,84      |
| TaV <sub>2</sub>                     | 10,0      | ZrTe <sub>2</sub> | 7,6       |

*Тетрагональная σ-фаза*

|                                 |      |                                      |      |
|---------------------------------|------|--------------------------------------|------|
| Zr <sub>3</sub> Ir              | 2,13 | Cr <sub>5</sub> Ru <sub>3</sub>      | 2,10 |
| VRe <sub>3</sub>                | 6,26 | Mo <sub>7</sub> Ir <sub>3</sub>      | 6,8  |
| Nb <sub>3</sub> Ir <sub>2</sub> | 9,8  | Mo <sub>5</sub> Os <sub>3</sub>      | 5,65 |
| Nb <sub>3</sub> Os <sub>2</sub> | 1,86 | Mo <sub>5</sub> Re <sub>3</sub>      | 6,5  |
| Nb <sub>x</sub> Pd <sub>y</sub> | 2,0  | Mo <sub>5</sub> Ru <sub>3</sub>      | 9,2  |
| Nb <sub>3</sub> Pt              | 4,2  | Mo <sub>3</sub> Tc <sub>7</sub>      | 15,8 |
| NbRe                            | 3,8  | W <sub>0,72</sub> Ir <sub>0,28</sub> | 4,46 |
| Nb <sub>3</sub> Rh <sub>2</sub> | 4,1  | W <sub>x</sub> Os <sub>y</sub>       | 4,4  |
| Ta <sub>2</sub> Pt <sub>3</sub> | 1,5  | W <sub>x</sub> Re <sub>y</sub>       | 5,2  |
| Ta <sub>3</sub> Re <sub>3</sub> | 1,4  | W <sub>3</sub> Ru <sub>2</sub>       | 4,67 |
| Ta <sub>3</sub> Rh <sub>2</sub> | 2,35 | W <sub>2</sub> Tc <sub>3</sub>       | 7,88 |
| Cr <sub>2</sub> Re <sub>3</sub> | 2,50 | ReFe <sub>3</sub>                    | 6,55 |

*Кубическая γ-фаза A12*

|                                  |      |                                  |      |
|----------------------------------|------|----------------------------------|------|
| Al <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> | 3,35 | Sc <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> | 2,2  |
| Hf <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> | 5,86 | TaOs                             | 1,95 |
| NbOs <sub>2</sub>                | 2,86 | Ta <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> | 6,78 |
| Nb <sub>3</sub> Pd <sub>2</sub>  | 2,47 | Ti <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> | 6,6  |
| NbRe                             | 9,7  | WRe <sub>3</sub>                 | 9,0  |
| NbTc                             | 10,5 | Zr <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> | 7,40 |
| MoRe <sub>3</sub>                | 9,89 | ZrTc <sub>6</sub>                | 9,7  |

*Кубические структуры*

| Тип структуры | Состав                          | $T_c$ , К | Тип структуры | Состав                                | $T_c$ , К |
|---------------|---------------------------------|-----------|---------------|---------------------------------------|-----------|
| B1            | GeTe                            | 0,04—0,31 | B2            | LiPb                                  | 7,2       |
|               | AsSn                            | 3,41—3,65 |               | Mg <sub>0,47</sub> Tl <sub>0,53</sub> | 2,75      |
|               | As <sub>3</sub> Sn <sub>4</sub> | 1,23—1,16 |               | OsTi                                  | 0,46      |
|               | SbSn                            | 1,3—2,37  |               | RuTi                                  | 1,07      |
| B2            | InPd                            | 0,70      |               | TiCo                                  | 0,71      |
|               | LaAg                            | 0,92—0,96 |               | TiO                                   | 2,3—0,58  |
|               |                                 |           |               | UCo                                   | 1,70      |

| Тип структуры   | Состав                      | $T_c$ , К   | Тип структуры   | Состав                           | $T_c$ , К   |
|-----------------|-----------------------------|-------------|-----------------|----------------------------------|-------------|
| B20             | AuBe                        | 2,64        | D8 <sub>2</sub> | Ag <sub>5</sub> Hg <sub>8</sub>  | 0,64        |
| C1              | GaPt                        | 1,74        | DO <sub>3</sub> | Cu — Sb                          | 0,127—1,84  |
|                 | AuAl <sub>2</sub>           | 0,095—0,074 | D2 <sub>3</sub> | RuBe <sub>13</sub>               | 1,3         |
|                 | AuGa <sub>2</sub>           | 1,12—1,05   | D7 <sub>3</sub> | La <sub>3</sub> S <sub>4</sub>   | 6,5—8,25    |
|                 | AuIn                        | 0,096—0,093 |                 | La <sub>3</sub> Se <sub>4</sub>  | 8,6—1,25    |
| C2              | CoSi <sub>2</sub>           | 1,22—1,4    |                 | La <sub>3</sub> Te <sub>4</sub>  | 2,45—3,75   |
|                 | PtGa <sub>2</sub>           | 1,7—1,9     | Сложные         | Be <sub>22</sub> Re              | 9,65        |
|                 | PRh <sub>2</sub>            | 1,3         |                 | Be <sub>22</sub> Tc              | 5,25        |
|                 | PtAl <sub>2</sub>           | 0,48—0,55   |                 | Be <sub>22</sub> Mo              | 2,529—5,545 |
|                 | AuSb <sub>2</sub>           | 0,58        |                 | Be <sub>22</sub> W               | 4,038—4,12  |
|                 | $\alpha$ -PdBi <sub>2</sub> | 1,45        |                 | AgAu <sub>4</sub>                | 0,4—0,7     |
|                 | IrTe <sub>2</sub>           | 0,3—1,18    |                 | AgTi <sub>3</sub>                | 2,6         |
|                 | PdSb <sub>2</sub>           | 0,35—1,25   |                 | AuZn <sub>3</sub>                | 1,21        |
|                 | RhSe <sub>2</sub>           | 6,0         |                 | Hg <sub>5</sub> Tl <sub>2</sub>  | 3,14—3,8    |
|                 | $\alpha$ -RhTe <sub>2</sub> | 0,51        |                 | In <sub>19</sub> Cd              | 3,0—3,55    |
|                 | CoHf <sub>2</sub>           | 0,56        | Нитриды         | Pd <sub>22</sub> S               | 1,63        |
| E9 <sub>3</sub> | CoTi <sub>2</sub>           | 3,44        |                 | Ph <sub>17</sub> S <sub>15</sub> | 5,8         |
| LI <sub>2</sub> | RhHf <sub>2</sub>           | 1,98        |                 | Sb <sub>2</sub> Tl <sub>7</sub>  | 5,20        |
|                 | RhZr <sub>3</sub>           | 11          |                 | $\gamma$ -SnTi                   | 4,2—6,4     |
|                 | AlLa <sub>3</sub>           | 6,16        |                 | TiN                              | 4,86—5,8    |
|                 | AlZr <sub>3</sub>           | 0,73        |                 | ZrN                              | 8,9—10,7    |
|                 | CaPb <sub>3</sub>           | 0,65        |                 | HfN                              | 6,2—8,7     |
|                 | CaTi <sub>3</sub>           | 2,0         |                 | VN                               | 7,5—8,2     |
|                 | BiTi <sub>3</sub>           | 4,15—4,4    |                 | NbN                              | 16,1        |
|                 | InLa <sub>3</sub>           | 10,40       |                 | TaN                              | 4,84—6,5    |
|                 | InLu <sub>3</sub>           | 0,14—0,24   |                 | Mo <sub>2</sub> N                | 5,0         |
|                 | LaIn <sub>3</sub>           | 0,70—0,71   | Карбиды         | ReN <sub>0,34</sub>              | 4—5         |
|                 | LaPb <sub>3</sub>           | 4,07—4,10   |                 | ThN                              | 3,2         |
|                 | LaSn <sub>3</sub>           | 6,02—6,55   |                 | UN                               | 5,6         |
|                 | LaTi <sub>3</sub>           | 1,51—1,63   |                 | $\alpha$ -MC <sub>x</sub>        | 9,26—14,3   |
|                 | NaPb <sub>3</sub>           | 5,62        |                 | NbC                              | 1,05—11,7   |
|                 | LuCa <sub>3</sub>           | 2,30        |                 | ReC                              | 3,4         |
|                 | SiNb <sub>3</sub>           | 1,5         |                 | Sc <sub>13</sub> C <sub>10</sub> | 8,5         |
|                 | SrBi <sub>3</sub>           | 2,62—5,70   |                 | TaC                              | 1,05—11,2   |
|                 | SrPb <sub>3</sub>           | 1,85        |                 | TcC                              | 3,85        |
|                 | ThPb <sub>3</sub>           | 5,5         |                 | TiC                              | 3,32—3,42   |
|                 | ThSn <sub>3</sub>           | 3,33        | Гидриды         | VC                               | 0,03        |
|                 | ThTi <sub>3</sub>           | 0,87        |                 | $\beta$ -WC <sub>r</sub>         | 5,2—10,0    |
|                 | YIn <sub>3</sub>            | 0,78        |                 | PdH                              | 5           |
|                 | YPb <sub>3</sub>            | 4,72        |                 | PdH <sub>2</sub>                 | 16          |
|                 | YTi <sub>3</sub>            | 1,52        | Бориды          | HfB                              | 3,1         |
|                 | YbAl <sub>3</sub>           | 0,94        |                 | ZrB                              | 2,8—3,4     |
|                 | YbPb <sub>3</sub>           | 0,23        |                 |                                  |             |
|                 | ZrHg <sub>3</sub>           | 3,28        |                 |                                  |             |

## Гексагональные структуры

|                 |                    |             |                  |                                 |           |
|-----------------|--------------------|-------------|------------------|---------------------------------|-----------|
| A3              | Ag <sub>2</sub> Al | 1,28—0,088  | B8 <sub>1</sub>  | PdSb                            | 1,44—1,67 |
| B8 <sub>1</sub> | Ag <sub>2</sub> Ga | 6,5—8       | C32              | PdTi                            | 3,85      |
|                 | Ag <sub>4</sub> Ge | 0,85        |                  | PtSb                            | 2,10      |
|                 | Ag <sub>5</sub> Sb | 0,019—0,065 |                  | PtSn                            | 0,37      |
|                 | Ag <sub>5</sub> Sn | 0,025—0,107 |                  | BiIn <sub>2</sub>               | 5,6       |
|                 | Au <sub>5</sub> In | 0,035—0,331 | DO <sub>19</sub> | MoB <sub>2</sub>                | 1,0—6,4   |
|                 | Au <sub>5</sub> Sn | 0,4—1,1     |                  | $\beta$ -ThSi <sub>2</sub>      | 2,41      |
|                 | Cu <sub>3</sub> Ge | 0,025—0,26  |                  | YGa <sub>2</sub>                | 1,68      |
|                 | Cu <sub>5</sub> Si | 0,050—0,058 |                  | AlTh                            | 0,75      |
|                 | Pb <sub>2</sub> Bi | 8,2—8,5     | D2d              | Cd <sub>3</sub> Mg              | 0,185     |
|                 | RhW                | 2,64—3,37   |                  | Hg <sub>3</sub> Li              | 1,7       |
|                 | RhMo               | 1,97        | D8 <sub>8</sub>  | LaIr <sub>5</sub>               | 2,13      |
|                 | AuSn               | 1,25        |                  | BaAu <sub>5</sub>               | 0,7—0,35  |
|                 | BiNi               | 4,25        |                  | Zr <sub>5</sub> Ga <sub>3</sub> | 2,5—4,0   |
|                 | BiPd <sub>2</sub>  | 4,0         |                  | Zr <sub>5</sub> Pb <sub>3</sub> | 4,60      |
|                 | BiPt               | 1,21—2,4    |                  | Zr <sub>5</sub> Sb <sub>3</sub> | 1,74      |
|                 | BiRh               | 2,06        |                  |                                 |           |

| Тип структуры    | Состав                          | $T_c$ , К | Тип структуры | Состав                          | $T_c$ , К |
|------------------|---------------------------------|-----------|---------------|---------------------------------|-----------|
| D10 <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> Ru <sub>7</sub>  | 2,58      | Сложные       | Hg <sub>4</sub> Na              | 3,05      |
|                  | Co <sub>3</sub> Th <sub>7</sub> | 1,83      |               | MoPd                            | 3,52      |
|                  | Fe <sub>3</sub> Th <sub>7</sub> | 1,86      |               | ε-MoRh <sub>2</sub>             | 1,97      |
|                  | Ir <sub>3</sub> La <sub>7</sub> | 2,24      |               | Nb <sub>3</sub> Te <sub>4</sub> | 1,49      |
|                  | Ir <sub>3</sub> Lu <sub>7</sub> | 0,72      |               | α-Pd <sub>2</sub> As            | 0,66      |
|                  | Ir <sub>3</sub> Th <sub>7</sub> | 1,52      |               | Pd <sub>5</sub> As <sub>2</sub> | 0,46      |
|                  | Ni <sub>3</sub> Th <sub>7</sub> | 1,98      |               | Re <sub>3</sub> B               | 2,8       |
|                  | Os <sub>3</sub> Th <sub>7</sub> | 1,51      |               | TaSi                            | 4,25—4,38 |
|                  | Pt <sub>3</sub> Th <sub>7</sub> | 0,98      |               | Tl <sub>3</sub> Bi <sub>5</sub> | 6,4—6,6   |
|                  | Rh <sub>3</sub> La <sub>7</sub> | 2,58      |               | HgSn <sub>6</sub>               | 5,1       |
|                  | Rh <sub>3</sub> Th <sub>7</sub> | 2,15      |               | Ta <sub>3</sub> N               | 10,6      |
|                  |                                 |           |               | MoN                             | 12,0      |
| B8 <sub>2</sub>  | Pd <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub> | 0,47—0,64 | Карбиды       | β-Mo <sub>2</sub> C             | 2,4—7,2   |
|                  | Zn <sub>2</sub> Rh              | 8,2—6,4   |               | γ-MoC <sub>x</sub>              | 7,4—9,26  |
| C7               | NbS <sub>2</sub>                | 5,4—6,15  |               | γ-MoC                           | 7,6—8,3   |
|                  | NbSe <sub>2</sub>               | 5,4—7,5   |               | Nb <sub>2</sub> C               | 1,98—9,11 |
|                  | NbTe <sub>2</sub>               | 0,5—0,74  |               | RuC                             | 1,9—2,0   |
|                  | TaS <sub>2</sub>                | 0,71—2,1  |               | Ta <sub>3</sub> C               | 3,2—3,3   |
|                  | TaSe <sub>2</sub>               | 0,13—0,22 |               | α-W <sub>2</sub> C              | 2,74—3,6  |
| B18              | CuS                             | 1,62      | Бориды        | γ-W <sub>2</sub> C              | 2,85—3,05 |
|                  | Ag <sub>2</sub> F               | 0,066     |               | Mo <sub>3</sub> B <sub>5</sub>  | 8,1       |
| Сложные          | AsRh <sub>4—1,6</sub>           | 0,03—0,56 |               | NbB <sub>2</sub>                | 1,0—6,4   |
|                  | β-Bi <sub>2</sub> Pt            | 0,155     |               | Nb <sub>2</sub> B <sub>5</sub>  | 6,4       |
|                  | γ-B <sub>4</sub> Rh             | 2,70      |               | Re <sub>2</sub> B               | 2,80      |
|                  |                                 |           |               | Ru <sub>7</sub> B <sub>3</sub>  | 2,58      |

## Тетрагональные структуры

|     |                   |           |                 |                                 |            |
|-----|-------------------|-----------|-----------------|---------------------------------|------------|
| C16 | AgZn <sub>2</sub> | 2,11—2,46 | D2 <sub>c</sub> | CoU <sub>6</sub>                | 2,29—2,4   |
|     | AgTh <sub>2</sub> | 2,19—2,26 |                 | FeU <sub>6</sub>                | 3,86       |
|     | AlTh <sub>2</sub> | 0,09      | L1 <sub>0</sub> | MnU <sub>6</sub>                | 2,32       |
|     | AuPb <sub>2</sub> | 3,10—3,15 |                 | NiU <sub>6</sub>                | 0,41       |
|     | AuTh <sub>2</sub> | 3,08—3,65 | C <sub>c</sub>  | α-LiBi                          | 2,47       |
|     | AuTi <sub>2</sub> | 4,2       |                 | NaBi                            | 2,25       |
|     | CoTa <sub>2</sub> | 0,82      | Сложные         | CaSi <sub>2</sub>               | 1,58       |
|     | CoZr <sub>2</sub> | 5,0—6,30  |                 | LaGe <sub>2</sub>               | 1,57—3,49  |
|     | CuAl <sub>2</sub> | 0,65      |                 | LaSi <sub>2</sub>               | 2,3—2,5    |
|     | CuTh <sub>2</sub> | 3,44—3,49 |                 | ScGe <sub>2</sub>               | 1,3—1,31   |
|     | GaHf <sub>2</sub> | 0,21      |                 | Sr <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> | 0,55       |
|     | GaZr <sub>2</sub> | 0,38      |                 | ThGa <sub>2</sub>               | 2,56       |
|     | FeZr <sub>2</sub> | 0,17      |                 | α-ThSi <sub>2</sub>             | 3,16—3,20  |
|     | NiHf <sub>2</sub> | 0,87      |                 | YGe <sub>2</sub>                | 2,4—3,8    |
|     | NiTa <sub>2</sub> | 0,90      |                 | Nb <sub>3</sub> Be <sub>2</sub> | 2,30       |
|     | NiZr <sub>2</sub> | 1,52—1,6  |                 | Ta <sub>3</sub> Be <sub>2</sub> | 1,0        |
|     | PdPb <sub>2</sub> | 2,95—3,01 |                 | Th <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> | 2,6        |
|     | PdTh <sub>2</sub> | 0,75—0,85 |                 | BaBi <sub>3</sub>               | 5,8        |
|     | PdTi <sub>2</sub> | 1,32      |                 | Tl <sub>5</sub> Te <sub>3</sub> | 2,28—2,078 |
|     | PtTi <sub>2</sub> | 1,58      |                 | β-In <sub>3</sub> Sn            | 7,3        |
|     | RhPb <sub>2</sub> | 1,32      | Бориды          | AuPb <sub>3</sub>               | 4,40       |
|     | RhSn <sub>2</sub> | 0,60      |                 | GeP                             | 1,8—4,2    |
|     | RhZr <sub>2</sub> | 10,8—11,1 |                 | Pd <sub>4</sub> Se              | 0,42—0,66  |
|     | ZrTh <sub>2</sub> | 0,67      |                 | Ta <sub>2</sub> B               | 0,06—3,12  |
|     | Mo <sub>3</sub> P | 5,31      |                 | W <sub>2</sub> B                | 3,10—3,22  |
|     | W <sub>3</sub> P  | 2,26      |                 | Mo <sub>2</sub> B               | 4,74—5,86  |

## Ромбические структуры

|     |      |      |     |                   |           |
|-----|------|------|-----|-------------------|-----------|
| B31 | AsRh | 0,58 | B31 | SnPd              | 0,41      |
|     | GeIr | 4,70 |     | SbRu              | 0,35—1,27 |
|     | GePt | 0,40 |     | PtTh              | 0,44      |
|     | GeRh | 0,96 |     | RhTh              | 0,36      |
|     | SiPd | 0,93 |     | AuSn <sub>4</sub> | 2,38      |
|     | SiPt | 0,88 |     | PtPb <sub>4</sub> | 2,8       |

| Тип структуры    | Состав                           | $T_c$ , К | Тип структуры   | Состав                                   | $T_c$ , К |
|------------------|----------------------------------|-----------|-----------------|------------------------------------------|-----------|
| Ортатормбические | CoLu <sub>3</sub>                | 0,35      | Ромбоэдрические | $\alpha$ -Pd <sub>7</sub> P <sub>3</sub> | 0,70      |
|                  | CoLa <sub>3</sub>                | 4,01      |                 | $\beta$ -Pd <sub>7</sub> P <sub>3</sub>  | 1,00      |
|                  | Bi <sub>3</sub> Ni               | 4,06      |                 | Zr <sub>3</sub> Au                       | 0,98      |
|                  | Bi <sub>3</sub> Rh               | 3,2       |                 | AuSn                                     | 2,48      |
|                  | AlRe <sub>8</sub>                | 1,85      | Сложные         | AsSn <sub>4</sub>                        | 1,16—1,19 |
|                  | Pd <sub>2</sub> Sn               | 0,41      |                 | Gc <sub>3</sub> Rh <sub>5</sub>          | 2,12      |
|                  | BiPd                             | 3,74—3,42 |                 | $\alpha$ -Mo <sub>2</sub> C              | 2,4—7,2   |
|                  | KHg <sub>2</sub>                 | 1,2       |                 | $\beta$ -W <sub>2</sub> C                | 3,1—3,90  |
|                  | PtTe                             | 0,59      | Бориды          | TaB                                      | 4,0       |
|                  | Rh <sub>5</sub> P <sub>4</sub>   | 1,22      |                 |                                          |           |
| Ромбоэдрические  | In <sub>3</sub> Te <sub>4</sub>  | 1,15—1,25 |                 |                                          |           |
|                  | Gc <sub>3</sub> Te <sub>4</sub>  | 1,80—1,55 |                 |                                          |           |
|                  | AsS <sub>4</sub>                 | 1,16—1,21 |                 |                                          |           |
|                  | P <sub>3</sub> Sn <sub>4</sub>   | 1,24—1,10 |                 |                                          |           |
|                  | Nb <sub>2</sub> Be <sub>17</sub> | 1,47      |                 |                                          |           |

Продолжение табл. 21.24

Другие типы структур и соединения, для которых тип структуры точно не установлен

| Состав                           | $T_c$ , К | Состав                            | $T_c$ , К   |
|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------|
| PdTe <sub>2</sub>                | 1,53—1,69 | OsBe <sub>2</sub>                 | 3,07        |
| $\beta$ -Pd <sub>2</sub> As      | 1,71      | PPb                               | 7,8         |
| Bi <sub>2</sub> Pd               | 1,7       | P <sub>2,65</sub> Sn <sub>4</sub> | 1,21—1,10   |
| Os <sub>4</sub> Al <sub>13</sub> | 5,9       | Pd <sub>2,5</sub> —2,8Se          | 2,20—2,30   |
| AuIn                             | 0,4—0,6   | Pd <sub>3</sub> Te                | 0,76        |
| NbRu <sub>3</sub>                | 1,2       | Pd <sub>5</sub> Te                | 0,40        |
| AsGe                             | 3—3,5     | Pt <sub>5</sub> Th                | 3,13        |
| Be <sub>5</sub> Ca               | 6,7       | RhBe <sub>2</sub>                 | 1,37        |
| Be <sub>5</sub> Ir               | 1,5       | RhSc <sub>3</sub>                 | 0,32—0,92   |
| Be <sub>5</sub> Os               | 9,2       | Rh <sub>2</sub> Te                | 0,49        |
| Be <sub>5</sub> Pt               | 2,3       | Rh <sub>5</sub> Th                | 1,07        |
| CaPb                             | 7,0       | RuBe <sub>2</sub>                 | 1,35        |
| CeIr <sub>3</sub>                | 3,34      | Ta <sub>2</sub> Ge                | 1,60        |
| CeIr <sub>5</sub>                | 1,82      | Y <sub>3</sub> Co                 | 0,34        |
| CoSe                             | 0,35      | YIr <sub>3-4</sub>                | 3,50        |
| Ge <sub>2</sub> Se               | 1,3—1,31  | CsC <sub>8</sub>                  | 0,020—0,135 |
| Hg <sub>3</sub> K                | 3,18      | KC <sub>8</sub>                   | 0,39—0,55   |
| Hg <sub>4</sub> K                | 3,27      | La <sub>2</sub> C <sub>3</sub>    | 5,9—11,0    |
| Hg <sub>6</sub> K                | 3,42      | La <sub>2</sub> C <sub>2</sub>    | 1,61—3,33   |
| In <sub>3</sub> Ru               | 2,68      | RbC <sub>8</sub>                  | 0,023—0,151 |
| Ir <sub>2</sub> Y                | 1,61      | Th <sub>2</sub> C <sub>3</sub>    | 4,1         |
| LaIr <sub>3</sub>                | 2,46      | V <sub>2</sub> C <sub>3</sub>     | 8,2         |
| LaRh <sub>5</sub>                | 1,65      | WC <sub>x</sub>                   | 2,4—4,05    |
| LaRh <sub>3</sub>                | 2,60      | Y <sub>2</sub> C <sub>3</sub>     | 6,0—11,5    |
| LuIr <sub>2</sub>                | 0,84      | YC <sub>2</sub>                   | 3,35—3,88   |
| LuRh <sub>5</sub>                | 0,49      | NbB                               | 8,25        |
| Mo <sub>2</sub> Sb <sub>4</sub>  | 2,10      | NbB <sub>6</sub>                  | 3?          |
| Nb <sub>3</sub> Se <sub>4</sub>  | 1,61      | ZrB <sub>12</sub>                 | 5,9—6,0     |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Landolt-Börnstein. Zählenwerte und Funktionen, II Bd, 6 Teil, 6 Auflage, Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag. 1959.
- Stewart G. R.//Rev. Sci. Instrum. 1983. Vol. 54, N 1. P. 1—10.
- Макдональд Д.//Физика низких температур: Пер.

Таблица 21.25. Сверхпроводимость соединений, имеющих техническое применение [16]

| Соединение         | $T_c$ , К | $I_c$ , А/см <sup>2</sup> (Тл), при 4,2 К | $B_{c2}$ , Тл (Т, К)               |
|--------------------|-----------|-------------------------------------------|------------------------------------|
| Nb <sub>3</sub> Sn | 18,1—18,5 | (1—8) · 10 <sup>5</sup> (0)               | 24,5—28 (0)                        |
| NbTi               | 9,5—10,5  | (3—8) · 10 <sup>4</sup> (5)               | 12,5—16,5 (1,2)                    |
| NbN                | 14,5—17,8 | (2—5) · 10 <sup>7</sup> (18)              | 12 (4,2)<br>25 (1,2)<br>8—13 (4,2) |

с англ./Под ред. А. И. Шальникова. М.: Изд-во иностр. лит. 1959.

- Handbuch der Physik. Berlin—Göttingen—Heidelberg. 1956. Bd XIX.
- Смнтеллс К. Дж. Вольфрам: Пер. с англ. Л.—М.: Металлургиздат. 1958.
- Soule D. E.//Phys. Rev. 1958. Vol. 112. P. 698—705.
- Primak W., Fuchs L. H. Phys. Rev. 1954. Vol. 95. P. 22—31.
- Spain J. L., Ubbelohde A. R., Young D. A.//Phil. Trans. Roy. Soc. 1967. Vol. 262, N 1128. P. 345—360.
- Landolt-Börnstein/Zählenwerte und Funktionen, 6 Auflage, Springer—Verlag, 1957. IV Bd, 3 Teil
- Техника высоких температур. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1959.
- Справочник по электротехническим материалам. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1960.
- Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М. Электротехнические материалы. М.: Энергия. 1969.
- Металловедение и термическая обработка/Под ред. акад. Н. Г. Гудцова. М.: Металлургия. 1966.
- Краткий справочник металлста/Под ред. проф. А. М. Малова. М.: Машиностроение. 1965.
- Савицкий Е. М., Тылкина М. Л., Поварова К. Б. Сплавы рения. М.: Наука. 1965.
- Сверхпроводящие материалы. М.: Металлургия. 1976.
- Коэн М. и др. Сверхпроводимость полупроводников и переходных металлов: Пер. с англ. М.: Мир. 1972.
- Киттель Ч. Введение в физику твердого тела: Пер. с англ. М.: Наука. 1978.

19. Schooley J. F.//J. Phys. 1978. Vol. 39, N C6. P. 1169.

20. Utton D. B., Soulen R. J., Marshak H.//Low Temp. Phys. 1975. Vol. 4. P. 76—85.

21. Durieux M., Astrov D. N., Kemp W. R. G., Swenson C. A.//Metrologia. 1979. Vol. 15. P. 57—72.

22. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кирина. М.: Атомиздат. 1976.

## Глава 22

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

С. Д. Лазарев, Е. З. Мейлихов

## 22.1. ВВЕДЕНИЕ

Вещества, в которых при  $T=0$  К верхняя из заполненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из незаполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не перекрываются, являются полупроводниками или диэлектриками. Граница между ними весьма условна — в полупроводниках энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной не очень велик, что приводит к появлению в зонах заметного числа свободных носителей заряда при  $T \neq 0$  К.

Обычно удельное сопротивление полупроводников (при  $T=290$  К) находится в интервале  $10^{-3} \leq \rho \leq 10^{10}$  Ом·см (в металлах  $\rho = 10^{-6} \div 10^{-4}$  Ом·см).

Характерными чертами этого класса веществ являются рост электропроводности с температурой, малая (по сравнению с металлами) концентрация носителей тока, высокая чувствительность электрических свойств по отношению к воздействию излучений и наличию примесей, а также неомическое поведение контактов.

**Ширина запрещенной зоны.** Ширина запрещенной зоны  $E_g$  представляет собой энергетический зазор между абсолютным максимумом валентной зоны и абсолютным минимумом зоны проводимости. Определяется по температурному ходу сопротивления или оптическими методами (край полосы поглощения, длинноволновая граница фотопроводимости). Значение  $E_g$  зависит от температуры и давления; зависимость определяется коэффициентами  $\alpha; \beta = dE_g/dT$  и  $\alpha_p = dE_g/dP$ .

**Подвижность носителей и проводимость.** Дрейфовая подвижность  $\mu_{др} = v_{др}/E$ , где  $v_{др}$  — дрейфовая скорость носителей в электрическом поле  $E$ . Определяется прямыми опытами по времени распространения инжектируемого импульса неосновных носителей в образце. Удельная проводимость  $\sigma$  связана с дрейфовой подвижностью  $\mu_n, \mu_p$  электронов и дырок и их концентрацией  $n$  и  $p$  соотношением  $\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p)$ . Измерение эффекта Холла позволяет определить холловскую подвижность  $\mu_H = |R\sigma|$ , где  $R$  — коэффициент Холла.

**Эффект Холла.** В полупроводнике, который помещен в магнитное поле, перпендикулярное протекающему по нему току, возникает электрическое поле, перпендикулярное току и магнитному полю. Это — так называемый эффект Холла, описываемый соотношением

$$E_H = RjH,$$

где  $E_H$  — напряженность холловского электрического поля;  $j$  — плотность тока;  $H$  — напряженность магнитного поля;  $R$  — коэффициент Холла.

В случае носителей одного сорта (концентрацией  $n$ )

$$R = \pm r/ne,$$

Здесь  $R$  измеряется в см<sup>3</sup>/Кл;  $n$  — в см<sup>-3</sup>;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $r$  — числовой множитель (так называемый холл-фактор), значение которого определяется механизмом релаксации импульса носителей. Знак  $R$  связан со знаком заряда но-

сителей ( $R < 0$  в образцах  $n$ -типа,  $R > 0$  в образцах  $p$ -типа).

При наличии двух сортов носителей (например, электронов и дырок)  $R$  зависит от напряженности магнитного поля:

$$R = \frac{R_n \sigma_n (1 + \sigma_p^2 H^2 R_p^2) + R_p \sigma_p (1 + \sigma_n^2 H^2 R_n^2)}{(\sigma_n + \sigma_p)^2 + \sigma_n \sigma_p (R_n + R_p) H^2}.$$

Здесь  $\sigma_n = ne\mu_n$ ;  $\sigma_p = pe\mu_p$ ;  $R_n = -1/ne$ ;  $R_p = 1/pe$ .

При  $H \rightarrow \infty$   $R \rightarrow \frac{1}{e(p-n)}$ , если  $p \neq n$ , и

$$R = \frac{1}{ne} \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n}, \quad \text{если } n = p.$$

Холловская подвижность носителей  $\mu_H$  определяется соотношением  $\mu_H = |R\sigma|$ .

**Время жизни носителей.** Время жизни  $\tau$  представляет собой время, за которое неравновесная концентрация носителей спадает за счет их рекомбинации до равновесного значения. Основные механизмы рекомбинации — излучательный (энергия рекомбинирующей пары электрон—дырка излучается в виде фотона), фононный (энергия передается решетке), ударный (энергия пары передается третьей частице).

Чаще всего имеет место не прямая рекомбинация, а процесс идет через рекомбинационные центры (примеси, дефекты).

Теоретическая оценка времени излучательной рекомбинации  $\tau_R$  дает верхний предел значения  $\tau$ . Для  $T=300$  К и концентрации, близкой к собственной, значения  $\tau_R$  приведены в табл. 22.1. Здесь же приведены реальные значения  $\tau$ .

Таблица 22.1. Время рекомбинации  $\tau$  и время излучательной рекомбинации  $\tau_R$  для некоторых полупроводников [162] (концентрация носителей близка к собственной,  $T = 300$  К)

| Полупроводник | Si                | Ge                | InSb              | InAs      | PbS       | PbSe              | PbTe              |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|
| $\tau_R$ , с  | 3                 | 0,3               | $3 \cdot 10^{-7}$ | $10^{-5}$ | $10^{-5}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ |
| $\tau$ , с    | $2 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-7}$ | $10^{-7}$ | $10^{-5}$ | —                 | —                 |

**Поверхностная рекомбинация.** Помимо рекомбинации в объеме носители могут рекомбинировать на поверхности полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации  $s$  определяется как скорость потока частиц из объема к поверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей. Скорость  $s$  сильно зависит от способа обработки поверхности. Так, для Ge при травлении поверхности в кипящей  $H_2O_2$   $s \approx 10$  см/с, а при шлифовке  $s \approx 10^6$  см/с и более. Обычно  $s \approx 10^2 \div 10^3$  см/с.

**Длина диффузии.** Длина диффузии  $L_D$  — расстояние, характеризующее пространственный спад неравновесной концентрации носителей до равновесного значения. Значение  $L_D$  определяется через коэффициент диффузии  $D$  и время жизни  $\tau$  с помощью соотношения  $L_D = \sqrt{D\tau}$ . Коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна  $D = kT\mu/e$  (в невырожденном полупроводнике). Максимальная длина диффузии характеризует степень совершенства и чистоты кристалла. При  $T = 300$  К  $L_D \approx 0,5$  см в Ge,  $L_D \approx 0,3$  см в Si,  $L_D \approx 10^{-2} - 10^{-3}$  см в InSb [162].

**Структура зон и эффективные массы.** Эффективная масса носителя характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса  $(m^*)^{-1}$  — тензорная величина, определяемая зависимостью  $E(p)$  энергии носителя от его квазиимпульса:

$$(m^*)_{ij}^{-1} = \partial^2 E(p) / \partial p_i \partial p_j.$$

Обычно достаточно знать вид  $E(p)$  лишь вблизи экстремальных точек — минимумов или максимумов энергии. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов часто представляют в виде сфер (с эффективными массами, например, для нескольких подзон валентной зоны  $m_{p1}$ ,  $m_{p2}$  и т. д.) или эллипсоидов (с эффективными массами для зоны проводимости  $m_{n\parallel}$ ,  $m_{n\perp 1}$ ,  $m_{n\perp 2}$  \*).

Для анализа различных экспериментальных данных часто пользуются понятием скалярной эффективной массы плотности состояний ( $m_{dp}$  и  $m_{dp}$  для электронов и дырок соответственно), которая в случае эллипсоидальных изоэнергетических поверхностей находится из соотношения

$$m_d = N^{2/3} (m_{\parallel} m_{\perp 1} m_{\perp 2})^{1/3},$$

где  $N$  — число экстремумов зоны.

В случае энергетических зон, имеющих вырожденные сферические поверхности постоянной энергии с эффективными массами  $m_{p1}$ ,  $m_{p2}$  и т. д., эффективная масса плотности состояний определяется следующим образом:

$$m_{dp} = \left( m_{p1}^{3/2} + m_{p2}^{3/2} + \dots \right)^{2/3}.$$

Вводятся также понятия омической эффективной массы  $m_\sigma$  и циклотронной эффективной массы  $m_c$ , определяемые соотношениями

$$\frac{1}{m_\sigma} = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{m_{\parallel}} + \frac{1}{m_{\perp 1}} + \frac{1}{m_{\perp 2}} \right)$$

(эллипсоидальные изоэнергетические поверхности),

$$m_c = \frac{h}{2\pi} \frac{\partial S}{\partial E}$$

( $S$  — площадь сечения изоэнергетической поверхности плоскостью, нормальной к магнитному полю).

Общие выражения для  $m_d$ ,  $m_\sigma$ ,  $m_c$  см., например, в [84].

Прямым методом определения  $E(p)$  и эффективных масс является циклотронный резонанс. Ценные сведения о зонной структуре и эффективных массах дают измере-

ния анизотропии магнетосопротивления, эффектов типа Шубникова — де Гааза и магнетооптических эффектов.

**Собственная концентрация носителей.** Собственная концентрация носителей  $n_i$  соответствует идеально чистому материалу и вычисляется, если известна структура зон и эффективные массы, по формуле

$$n_i = 4,82 \cdot 10^{15} T^{3/2} \left( \frac{m_{dn} m_{dp}}{m_0^2} \right)^{3/4} \exp \left( \frac{E_g - \alpha_T T}{2kT} \right),$$

где  $m_{dn}$ ,  $m_{dp}$  — эффективная масса плотности состояний электронов и дырок соответственно;  $m_0$  — масса свободного электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\alpha_T$  — коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной зоны.

Обычно  $n_i$  определяют экспериментально по данным измерений эффекта Холла и проводимости в соответствующем интервале температур.

**Температура Дебая**  $T_D$  определяется через граничную частоту  $\omega_m$  колебаний решетки с помощью соотношения:

$$kT_D = \hbar \omega_m.$$

Различным ветвям колебаний соответствуют, вообще говоря, различные значения температуры Дебая. Значения  $T_D$ , определяемые из тепловых измерений, являются усредненными по существенным при температуре измерений ветвям колебаний. Более детальную информацию дают, например, измерения упругих констант.

**Предельная частота оптических фононов**  $\omega_i$ ,  $\omega_t$  есть частота соответствующих (продольных и поперечных) оптических колебаний решетки с длиной волны, значительно превышающей межатомное расстояние. Определяется из спектров поглощения и отражения инфракрасного излучения, а также с помощью нейтронной спектроскопии. Для элементов (Si, Ge и др.):  $\omega_l = \omega_t = \omega_0$ .

**Фактор спектроскопического распределения**  $g$  в зоне проводимости (или валентной) определяется расщеплением энергетических уровней носителей в магнитном поле за счет их магнитного момента

$$E = \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_H \pm \frac{1}{2} g \hbar \omega_H, \quad n = 1, 2, \dots,$$

где  $\omega_H$  — циклотронная частота носителя заряда в кристалле, определяется из измерений осцилляционных эффектов в магнитном поле методом пара- и ядерного магнитного резонанса.

**Диэлектрическая проницаемость.** Значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_\infty$  получают из статических и высокочастотных (или оптических) измерений соответственно. В таблицах везде, где не отмечено специально, приводимые значения относятся к  $T = 290$  К.

В таблицы в основном включены данные о полупроводниках с  $E_g < 3$  эВ. Тройные и более сложные полупроводниковые соединения не описаны \*. Не приведены также сведения о параметрах различных полупроводниковых приборов

## 22.2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

### 22.2.1 Кремний и германий

Кремний и германий — широко используемые и наиболее исследованные полупроводники. Кристаллизуются в решетке алмаза. Имеют сложную зонную структуру.

\* Часто  $m_{\perp 1} = m_{\perp 2}$  тогда употребляется обозначение  $m_{\perp} = m_{\perp 1} = m_{\perp 2}$ .

\* О свойствах некоторых классов тройных соединений — см. [16, 121, 123, 145, 289, 290].

Таблица 22.2. Электрофизические свойства элементарных полупроводников [293]

| Элемент      | Кристаллическая структура |                                                   | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К            | $E_g$ , эВ                                                     | $\partial E_g / \partial T$ , 10 <sup>-4</sup> эВ/К |
|--------------|---------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|              | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                                    |                            |                         |                                                                |                                                     |
| $\alpha$ -В  | Ромбоэдр., $D_{3d}^5$     | 0,5057 ( $a$ ),<br>$\alpha = 58^\circ 06'$        | 2,45                       | 2350—2400               | 1,97 ( $E \parallel c$ )<br>1,90 ( $E \perp c$ )               | —                                                   |
| $\beta$ -В   | То же                     | 1,014 ( $a$ ),<br>$\alpha = 65^\circ 17'$         | 2,33                       | 2350—2400               | 1,63 ( $E \parallel c$ )<br>1,61 ( $E \perp c$ )<br>1,56 (0 К) | —2                                                  |
| С (алмаз)    | Куб., $O_h^5$             | 0,3566 [1]                                        | 3,51 [123]                 | 4300 [123]              | 5,4 [28]<br>5,48 [292]                                         | —1,2 [28]<br>—0,5 [292]                             |
| Р (черный)   | Орторомб., $D_{2h}^{18}$  | 0,331 ( $a$ );<br>0,437 ( $b$ );<br>1,047 ( $c$ ) | 2,70                       | 1300                    | 0,33 (0 К)                                                     | —2,8                                                |
| $\alpha$ -S  | Орторомб., $D_{2h}^{24}$  | 1,046 ( $a$ );<br>1,288 ( $b$ );<br>2,448 ( $c$ ) | 2,069                      | —                       | 3,8                                                            | —                                                   |
| As (серый)   | Ромбоэдр., $D_{3d}^5$     | 0,376 ( $a$ );<br>1,076 ( $c$ )                   | 5,72                       | 1090                    | 0,175                                                          | —                                                   |
| Se           | Триг., $D_3^4, D_3^6$     | 0,435 ( $a$ );<br>0,494 ( $c$ )                   | 4,819                      | 490                     | 1,9 (5 К)                                                      | —2,7                                                |
| $\alpha$ -Se | Моноклин.                 | 0,905 ( $a$ );<br>0,907 ( $b$ );<br>1,161 ( $c$ ) | 4,9                        | —                       | 2,48 (5 К)                                                     | —                                                   |
| $\alpha$ -Sn | Куб., $O_h^7$             | 0,649 [292]                                       | 7,28 [292]                 | 505* <sup>2</sup> [121] | 0,09 [122]                                                     | —5 [122]                                            |
| Sb           | Ромбоэдр., $D_{3d}^5$     | 0,4308 ( $a$ );<br>1,1274 ( $c$ )                 | 6,69                       | 903                     | 0,1 (1,15 К)                                                   | —                                                   |
| Te           | Триг., $D_3^4, D_3^6$     | 0,446 ( $a$ );<br>0,595 ( $c$ )                   | 6,24                       | 723                     | 0,335 (4,2 К)                                                  | +1,8 ( $T < 4,2$ К)<br>—0,4 (100—300 К)             |

| $T_D$ , К                | $m_n/m_0$                                                   | $m_p/m_0$                                                   | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В·с)                              | $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /(В·с)  | $\epsilon_0$                                        | $\epsilon_\infty$                                 | $n_i$ , см <sup>-3</sup> |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|
| 1430 (0 К)               | —                                                           | —                                                           | —                                                             | 120                               | —                                                   | —                                                 | —                        |
| 1220 (100 К)             | 4,5                                                         | 1,8                                                         | 1 [11]                                                        | 300                               | 11,55 ( $E \perp c$ );<br>10,24 ( $E \parallel c$ ) | 9,12 ( $E \perp c$ );<br>8,41 ( $E \parallel c$ ) | —                        |
| 1300 (0 К)               | —                                                           | —                                                           | —                                                             | —                                 | —                                                   | —                                                 | —                        |
| 2240* <sup>1</sup> [123] | 1,4 ( $m_t$ ) [313]                                         | 2,35* <sup>3</sup> [15]                                     | 1800 ( $\sim T^{-3/2}$ )<br>[11]                              | 1400 ( $\sim T^{-3/2}$ )<br>[123] | 5,7 [292]                                           | 5,7 [121]                                         | —                        |
| —                        | 0,36 ( $m_t$ )                                              | 2,1 [123]                                                   | —                                                             | —                                 | —                                                   | —                                                 | —                        |
| 400                      | 0,16 ( $m_{n1}$ )<br>0,81 ( $m_{n2}$ )<br>0,24 ( $m_{n3}$ ) | 0,17 ( $m_{p1}$ )<br>0,71 ( $m_{p2}$ )<br>0,59 ( $m_{p3}$ ) | 220                                                           | 350                               | —                                                   | —                                                 | —                        |
| 250                      | —                                                           | —                                                           | 7,5                                                           | 10                                | 3,6—4,6<br>(анизотропна)                            | —                                                 | —                        |
| 250                      | 0,134 ( $m_{n1}$ )                                          | 0,146 ( $m_{p1}$ )                                          | 40—550                                                        | 50—1210                           | 50                                                  | —                                                 | 2,16·10 <sup>30</sup>    |
| 282 (4,2 К)              | 1,252 ( $m_{n2}$ )<br>0,141 ( $m_{n3}$ )                    | 0,104 ( $m_{p2}$ )<br>0,166 ( $m_{p3}$ )                    | (анизотропна)                                                 | (анизотропна)                     | —                                                   | —                                                 | —                        |
| 152,5                    | —                                                           | 1,4 ( $m_d$ )                                               | —                                                             | 40                                | —                                                   | —                                                 | 10 <sup>14</sup>         |
| 171 (0 К)                | —                                                           | —                                                           | —                                                             | —                                 | —                                                   | —                                                 | —                        |
| 128 (< 20 К)             | —                                                           | —                                                           | 4 ( $\sim T^{-3/2}$ )                                         | 0,2                               | 7,39                                                | 6,1                                               | —                        |
| 230 [121]                | 0,023 [122]                                                 | 0,26 [122]                                                  | 2500 ( $\sim T^{-1,65}$ )<br>[11]                             | 2400 ( $\sim T^{-2}$ )<br>[11]    | —                                                   | 24 [292]                                          | —                        |
| —                        | —                                                           | 0,20* <sup>4</sup> [292]                                    | 10 <sup>5</sup> (78 К) [238]<br>10 <sup>5</sup> (4,2 К) [238] | —                                 | —                                                   | —                                                 | —                        |

| $T_D, K$                       | $m_n/m_0$                                                    | $m_p/m_0$                                                     | $\mu_n^*, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | $\mu_p^*, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | $\epsilon_0$ | $\epsilon_\infty$            | $n_i, \text{см}^{-3}$ |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|------------------------------|-----------------------|
| 168 (10 K)<br>211 (0 K)        | 0,068 ( $m_{n1}$ )<br>0,63 ( $m_{n2}$ )<br>0,34 ( $m_{n3}$ ) | 0,093 ( $m_{p1}$ )<br>1,14 ( $m_{p2}$ )<br>0,093 ( $m_{p3}$ ) | 0,11—2,74<br>(анизотропна)                       | 0,18—3,63<br>(анизотропна)                       | 80 (4,2 K)   | —                            | $4,2 \cdot 10^{19}$   |
| 140 ( $\perp c$ )<br>[220]     | 0,06 ( $m_\perp$ )                                           | 0,114 ( $m_\perp$ )                                           | 2380 ( $\parallel c$ )                           | 1260 ( $\parallel c$ )                           | —            | 23 ( $\perp c$ )<br>[28]     | $5,6 \cdot 10^{15}$   |
| 290 ( $\parallel c$ )<br>[120] | 0,05 ( $m_\parallel$ )                                       | 0,109 ( $m_\parallel$ )                                       | 1150 ( $\perp c$ )                               | 650 ( $\perp c$ )                                | —            | 39 ( $\parallel c$ )<br>[28] |                       |

\* $\hbar \omega_i = \hbar \omega_L = 0,165 \text{ эВ}$  [123]

\* $^2$  Переходит в  $\beta$ -Sn при 558 K.

\* $^3$  Тяжелые дырки. Для легких дырок  $m_p/m_0 = 0,7$  [313].

\* $^4$  Тяжелые дырки. Для легких дырок  $m_p/m_0 = 0,06$  [292]

Таблица 22.3. Электрофизические свойства Si и Ge

| Элемент | Кристаллическая структура |                      | $\rho, \text{г/см}^3$ [123] | $T_{пл}^*, K$ [123] | $T_D, K$ [117]    | $\hbar \omega_0, \text{эВ}$ , [123] | $\epsilon_0$ [28] | $\sigma_\infty$                                                                       |
|---------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|         | Система, группа           | $a, \text{нм}$ [123] |                             |                     |                   |                                     |                   |                                                                                       |
| Si      | Куб., $O_h^7$             | 0,543                | 2,33                        | 1690                | 689<br>539 (80 K) | 0,063                               | 11,7              | 12,7 ( $\lambda = 1,05 \text{ мкм}$ ) [28]<br>13,7 ( $\lambda = 8 \text{ мм}$ ) [117] |
| Ge      | То же                     | 0,566                | 5,32                        | 1210                | 406<br>353 (80 K) | 0,037                               | 16                | 16,5 ( $\lambda = 2,5 \text{ мкм}$ ) [28]                                             |

| Элемент | $E_g^*, \text{эВ}$ [292] | $E_{\Gamma\Lambda}, \text{эВ}$ | $E_{\Gamma\Lambda}, \text{эВ}$ | $\Delta_{so}, \text{эВ}$ | $\partial E_g / \partial T, 10^{-4} \text{ эВ/К}$ [292] | $\partial E_g / \partial P, 10^{-6} \text{ эВ/бар}$ | $\partial E_{\Gamma\Lambda} / \partial T, 10^{-4} \text{ эВ/К}$ | $\partial E_{\Gamma\Lambda} / \partial P, 10^{-6} \text{ эВ/бар}$ | $\partial E_{\Gamma\Lambda} / \partial P, 10^{-11} \text{ эВ/Па}$ ( $10^{-6} \text{ эВ/ат}$ ) |
|---------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Si      | 1,11<br>1,17 (0 K)       | 2,3 [84]                       | 1,5 [84]                       | 0,044 [123]              | —2,8                                                    | —1,4 [292]<br>—3,8 [80 K]                           | —                                                               | —                                                                 | —                                                                                             |
| Ge      | 0,664<br>0,744 (1,5 K)   | 0,05 [123]<br>0,15 [84]        | 0,02 [123]                     | 0,28 [117]<br>0,30 [123] | —3,7                                                    | 5 [123]<br>3 [292]                                  | —4 [123]                                                        | 7 [123]                                                           | —(12—14) [123]                                                                                |

| Элемент | $m_n^*/m_0$ [84]                             | $m_{dn}^*/m_0$ | $m_{nd}^*/m_0$ [117] | $m_{p1}^*/m_0$ | $m_{p2}^*/m_0$ | $m_{p3}^*/m_0$ | $m_{dp}^*/m_0$ | $n_i, \text{см}^{-3}$ [292]     | $\epsilon_i, \text{Ом} \cdot \text{см}$ [11] | $\mu_n^*, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ | $\mu_p^*, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ |
|---------|----------------------------------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Si      | 0,9163 ( $\parallel$ )<br>0,1905 ( $\perp$ ) | 0,33           | 0,26                 | 0,537          | 0,153          | 0,25           | 0,81<br>[292]  | $1,02 \cdot 10^{10}$<br>(300 K) | $2,3 \cdot 10^5$                             | 3000<br>( $\sim T^{-2,6}$ )                      | 500 [123]<br>( $\sim T^{-2,3}$ ) [117]           |
| Ge      | 1,588 ( $\parallel$ )<br>0,0815 ( $\perp$ )  | 0,22           | 0,12                 | 0,34           | 0,043          | 0,08           | 0,39<br>[123]  | $2,33 \cdot 10^{13}$<br>(300 K) | 47                                           | 3800<br>( $\sim T^{-2,3}$ )                      | 1820 [123]<br>( $\sim T^{-1,67}$ ) [28]          |



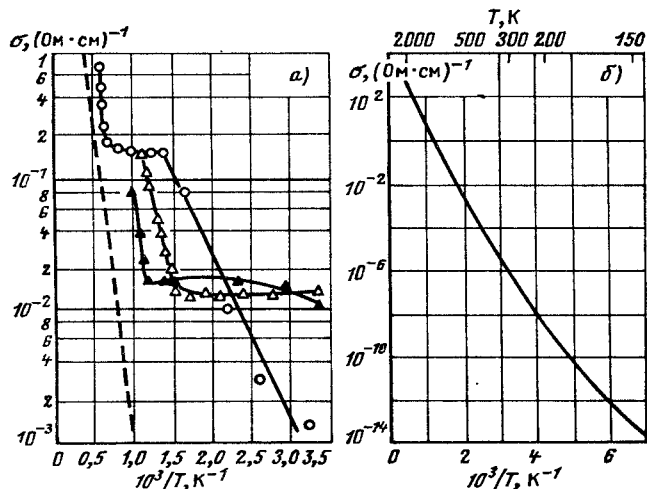


Рис. 22.1. Температурная зависимость удельной проводимости  $\alpha$ -В(а) и  $\beta$ -В(б):

пунктир — асимптотическое приближение при  $E_a=1$  эВ;  
 $\Delta$  — гранулы;  $\blacktriangle$  — кристаллы;  $\circ$  — поликристалл

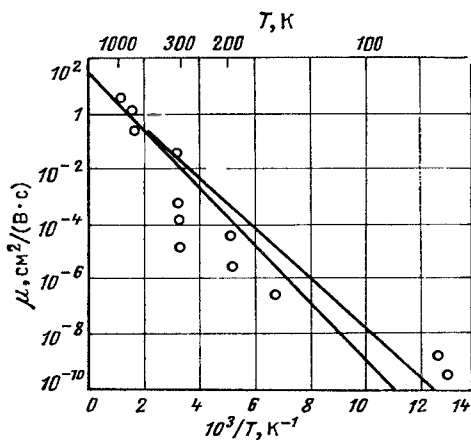


Рис. 22.4. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в  $\beta$ -В [293]:  
 линии — расчет по разным моделям

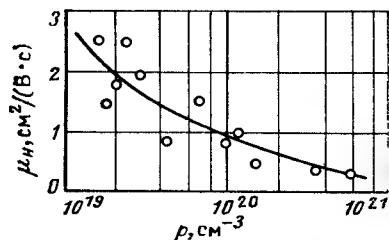


Рис. 22.5. Зависимость холловской подвижности электронов в поликристаллическом  $\beta$ -В от концентрации носителей [7, 14]

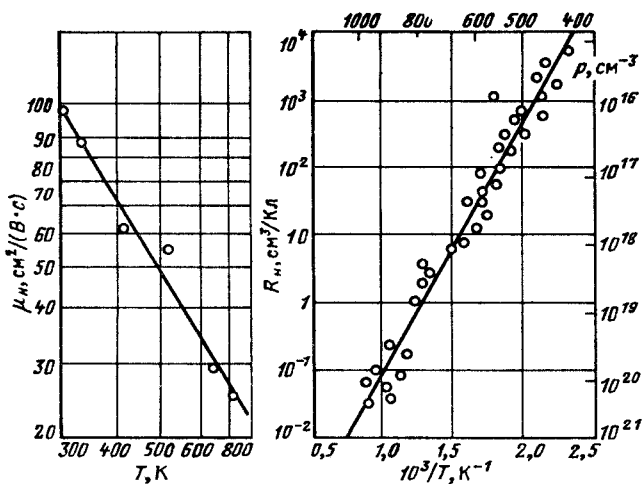


Рис. 22.2

Рис. 22.2. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в  $\alpha$ -В [6]

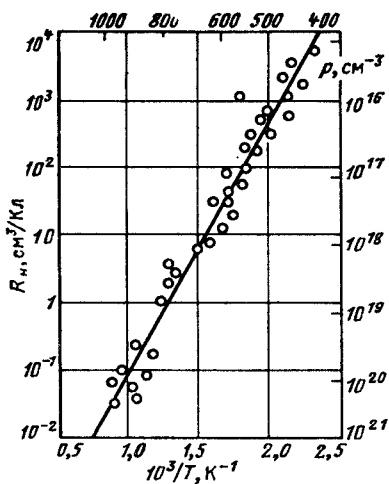


Рис. 22.3

Рис. 22.3. Температурная зависимость коэффициента Холла и концентрация дырок в  $\beta$ -В при высоких температурах [293]

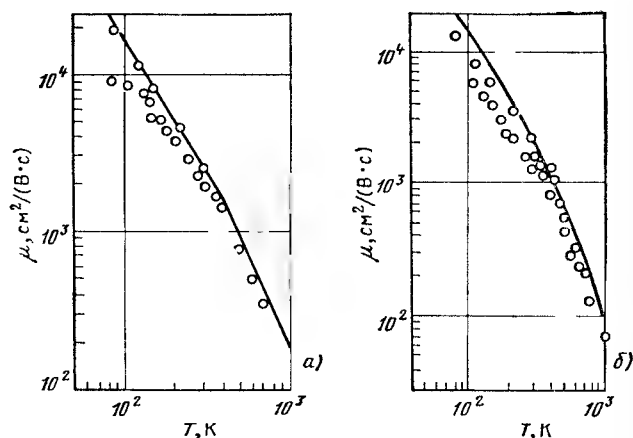


Рис. 22.6. Температурные зависимости подвижности электронов (а) и дырок (б) в алмазе [313]

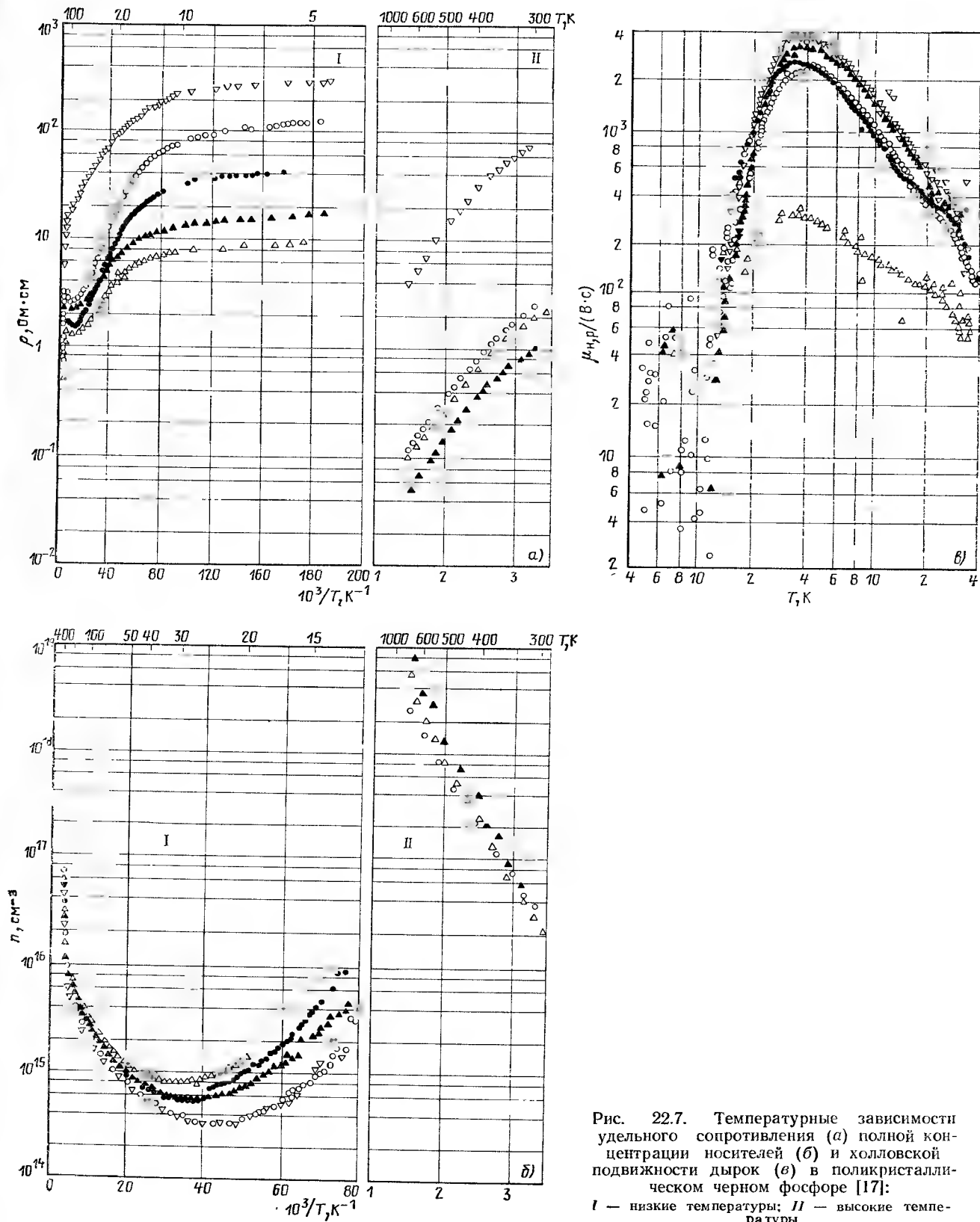


Рис. 22.7. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) полной концентрации носителей (б) и холловской подвижности дырок (в) в поликристаллическом черном фосфоре [17]: I — низкие температуры; II — высокие температуры

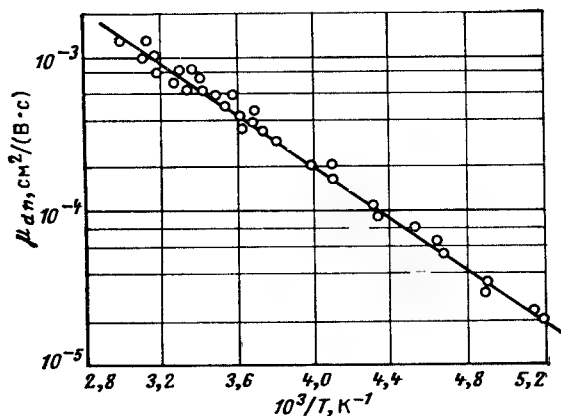


Рис. 22.8. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в α-S [37]

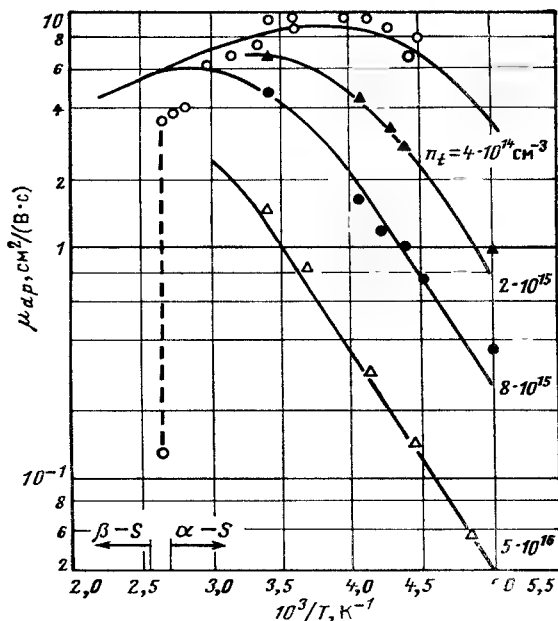


Рис. 22.10. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в α-S для образцов с различной концентрацией дырочных ловушек  $n_A$ . При фазовом переходе  $\alpha\text{-S} \rightarrow \beta\text{-S}$  подвижность резко уменьшается [53]

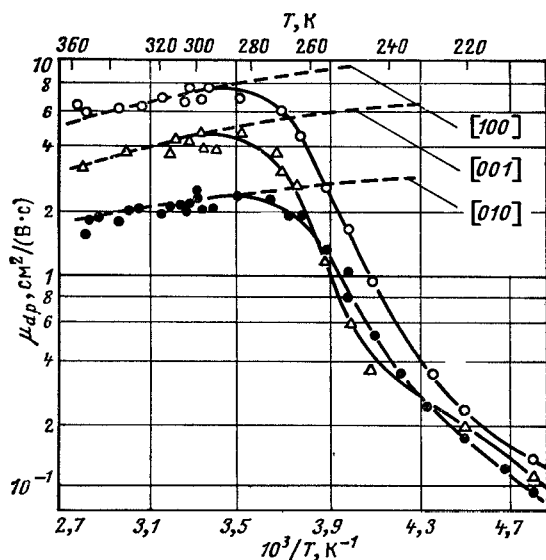


Рис. 22.9. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок вдоль различных кристаллических осей в α-S [39]:  
пунктир — зависимость  $\mu \propto T^{-n}$ , где  $n=1,6$  [100],  $n=1,1$  [010],  $n=1,7$  [001]

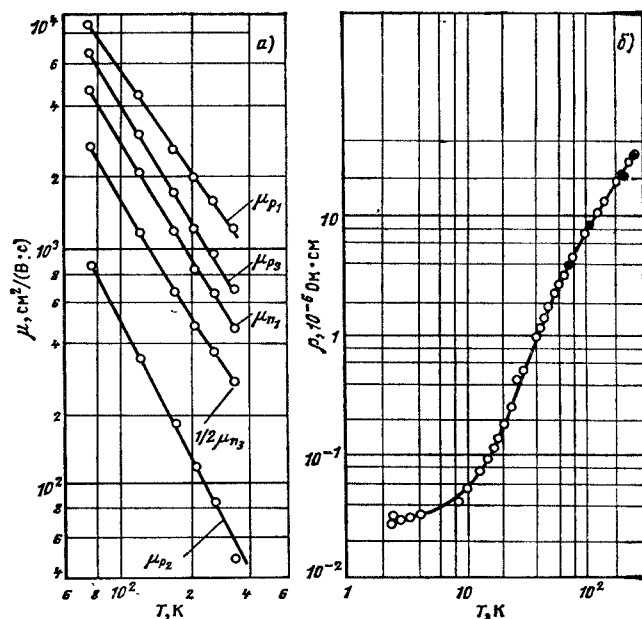


Рис. 22.11. Температурные зависимости подвижности электронов и дырок (а) и удельного сопротивления (б) в As. Характер зависимости  $\mu_{п1}$ ,  $\mu_{п2}$  и  $\mu_{п3} \propto T^{-1,7}$ ,  $\mu_{п1} \propto T^{-1,5}$ ,  $\mu_{п2} \propto T^{-2,0}$  [57]

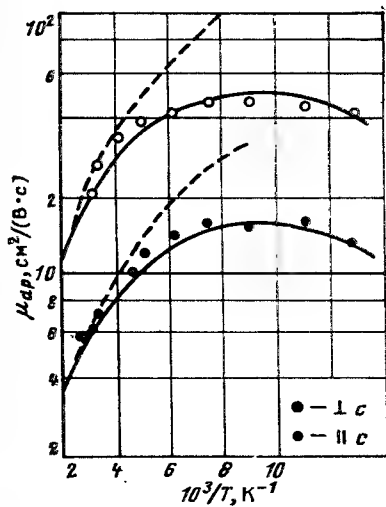


Рис. 22.12. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в тригональном Se [19]:  
пунктир соответствует зависимости  $T^{-3/2}$

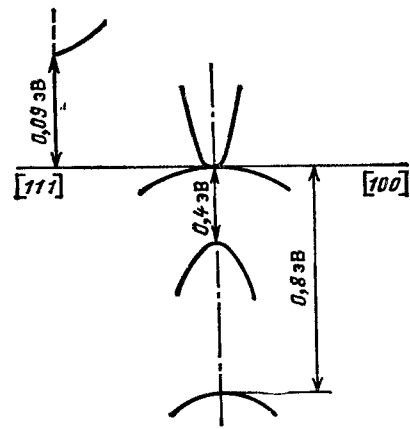


Рис. 22.14. Зонная структура α-Sn [171]

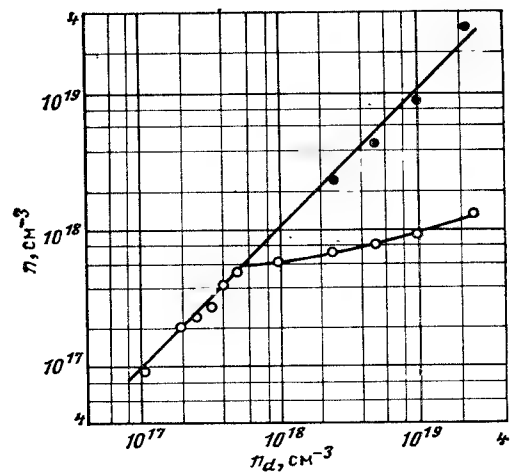


Рис. 22.15. Зависимость концентрации электронов в α-Sn при  $T=4,2$  К от концентрации доноров [24]:  
○ — легкие электроны; ● — все электроны

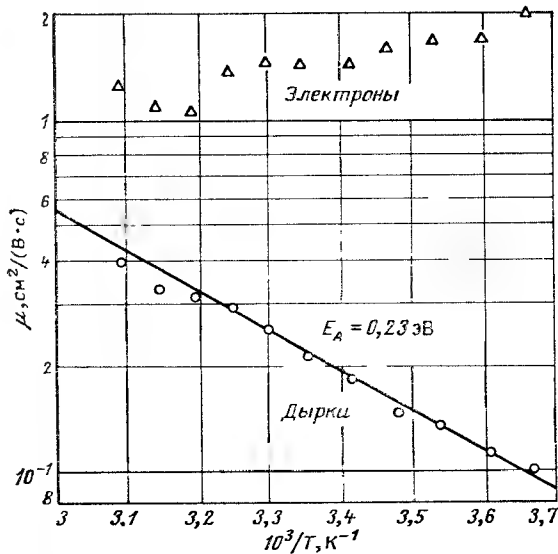


Рис. 22.13. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок и электронов в моноклинном Se ( $E_A$  — энергия активации подвижности дырок) [20]

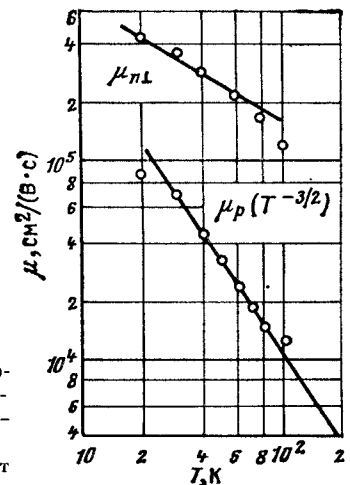


Рис. 22.16. Температурная зависимость подвижности легких электронов и дырок в α-Sn: сплошные линии — расчет [24]

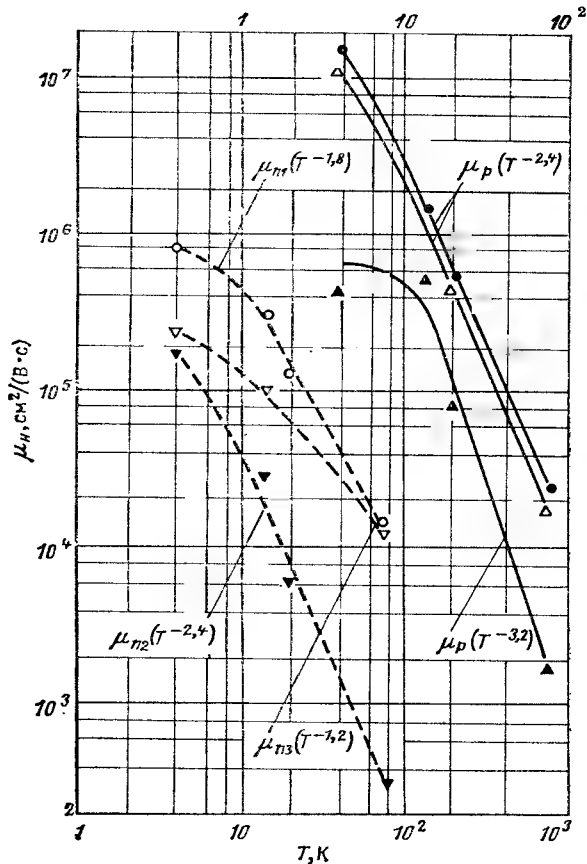


Рис. 22.17. Температурные зависимости компонентов тензора подвижностей электронов (пунктирные линии) и дырок (сплошные линии) в Sb [29]. Концентрация электронов и дырок —  $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . нижняя шкала температур для  $\mu_n$ , верхняя — для  $\mu_p$

В Si 6 эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [100] внутри зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности имеют вид эллипсоидов вращения (число эллипсоидов — 6).

В Ge 8 эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [111] на границе зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности — эллипсоиды вращения (эквивалентное число эллипсоидов 4).

Валентные зоны Si и Ge расщеплены на три подзоны, две из которых вырождены в точке  $k=0$ , а третья отщеплена за счет спинорбитального взаимодействия.

Схемы энергетических зон Si и Ge (с использованными в таблицах обозначениями) представлены на рис. 22.22, 22.23.

Электрофизические свойства Si и Ge представлены в табл. 22.3—22.5 и на рис. 22.24—22.43.

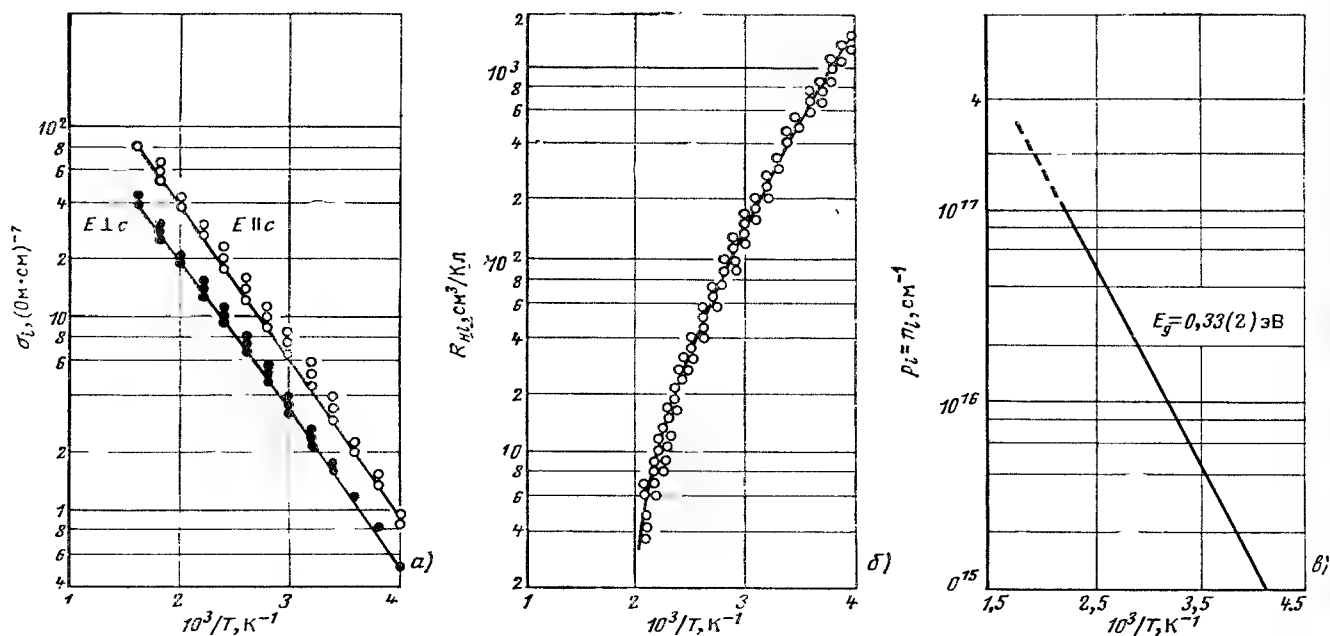


Рис. 22.18. Температурные зависимости удельной проводимости (а), коэффициента Холла (б) и собственной концентрации носителей (в) в Te [30]

Таблица 22.4. Свойства примесей в Si [292]

| Примесь               | Ag                   |                      | Al    | As    | Au      |     | B     | Bi    | Cu                   |
|-----------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|---------|-----|-------|-------|----------------------|
| Тип <sup>*1</sup>     | A                    | D                    | A     | D     | A       | D   | A     | D     | A                    |
| $E_i, \text{эВ}^{*2}$ | 0,93<br>0,86<br>0,40 | 0,59<br>0,83<br>0,89 | 0,068 | 0,054 | 0,6—0,7 | 0,8 | 0,045 | 0,071 | 0,24<br>0,37<br>0,52 |

| Примесь               | Fe  | Ga    | In    | Li    | O    | P     | S    | Sb    | Tl    | Zn             |
|-----------------------|-----|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|----------------|
| Тип <sup>*1</sup>     | A   | A     | A     | D     | D    | D     | D    | D     | A     | A              |
| $E_i, \text{эВ}^{*2}$ | 0,4 | 0,071 | 0,155 | 0,034 | 0,06 | 0,045 | 0,31 | 0,043 | 0,246 | 0,316<br>0,617 |

<sup>\*1</sup> D — донор, A — акцептор.<sup>\*2</sup> Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

Таблица 22.5. Свойства примесей в Ge [117, 123, 292]

| Примесь               | Al     | Ag                 | As     | Au                   | B      | Be   | Bi     | Cd           | Co                   | Cr           | Cu                  | Fe           |
|-----------------------|--------|--------------------|--------|----------------------|--------|------|--------|--------------|----------------------|--------------|---------------------|--------------|
| Тип <sup>*1</sup>     | A      | A                  | D      | A                    | A      | A    | D      | A            | A                    | A            | A                   | A            |
| $E_i, \text{эВ}^{*2}$ | 0,0111 | 0,13<br>0,5<br>0,7 | 0,0142 | 0,16<br>0,59<br>0,75 | 0,0108 | 0,07 | 0,0128 | 0,05<br>0,15 | 0,09<br>0,25<br>0,48 | 0,07<br>0,12 | 0,33<br>0,4<br>0,53 | 0,35<br>0,52 |

| Примесь               | Ga     | In     | Li     | Mn   | Ni  | O                     | P      | Pt         | S    | Sb     | e    | Te           |
|-----------------------|--------|--------|--------|------|-----|-----------------------|--------|------------|------|--------|------|--------------|
| Тип <sup>*1</sup>     | A      | A      | D      | A    | D   | D                     | D      | A          | D    | D      | D    | D            |
| $E_i, \text{эВ}^{*2}$ | 0,0113 | 0,0120 | 0,0100 | 0,16 | 0,3 | 0,017<br>0,04<br>0,20 | 0,0129 | 0,2<br>0,4 | 0,18 | 0,0103 | 0,14 | 0,11<br>0,30 |

<sup>\*1</sup> D — донор, A — акцептор.<sup>\*2</sup> Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, а для акцепторов — от края валентной зоны.

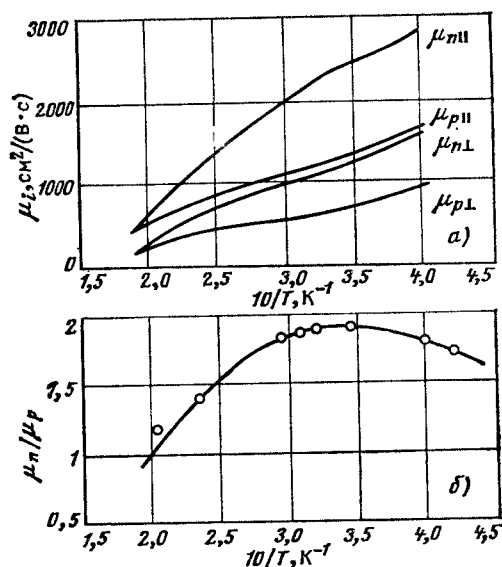


Рис. 22.19. Температурные зависимости подвижности электронов и дырок (а) и отношения подвижностей (б) в области собственной проводимости Те [30]

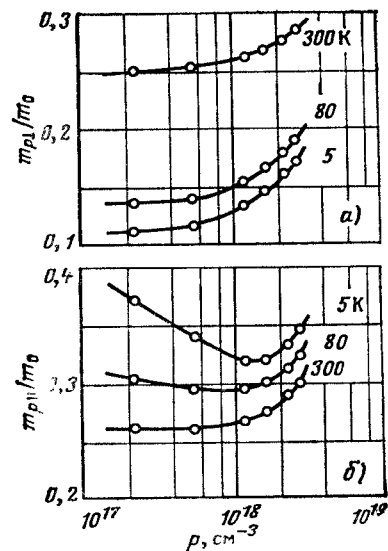


Рис. 22.21. Зависимость поперечной (а) и продольной (б) эффективной массы дырок от их концентрации в Те [293]

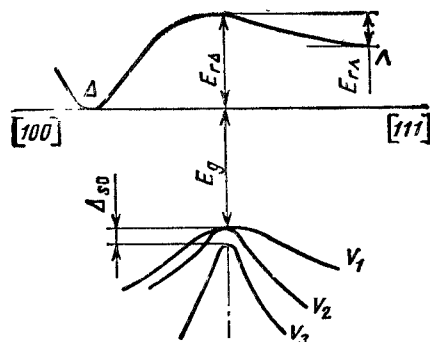


Рис. 22.22. Зонная структура Si [117]

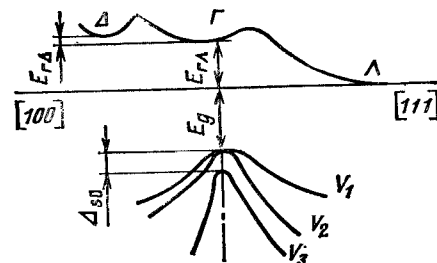


Рис. 22.23. Зонная структура Ge [117]

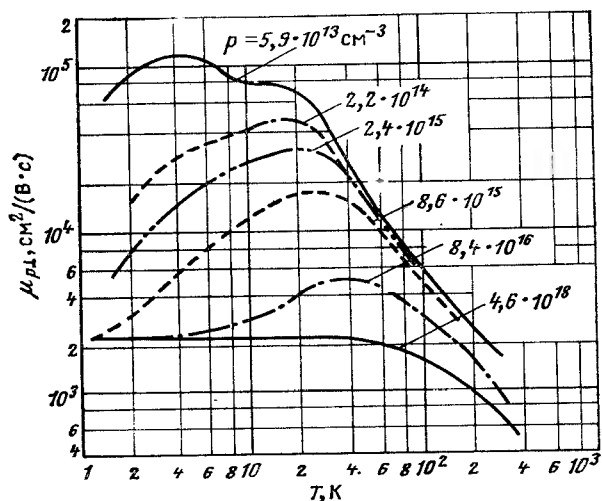


Рис. 22.20. Температурная зависимость подвижности дырок в Те вдоль оси с [35]

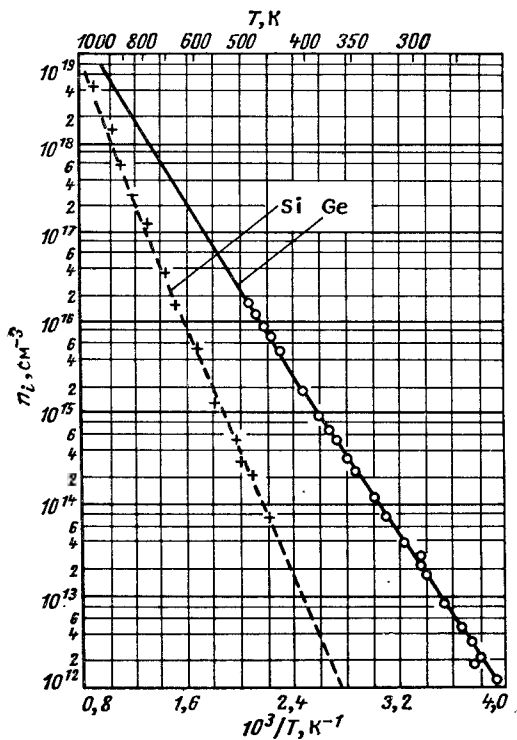


Рис. 22.24. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в Ge и Si [221]

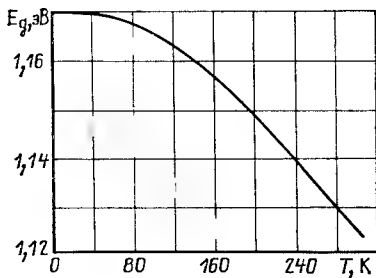


Рис. 22.25. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны Si [58]

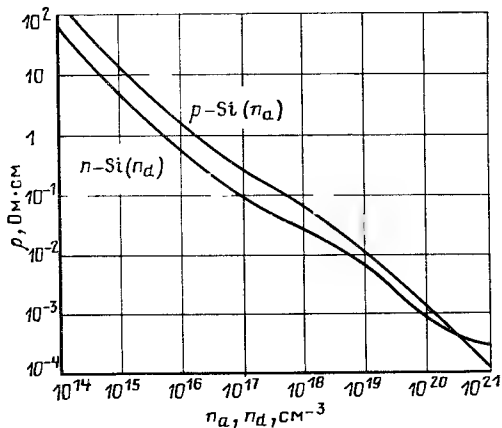


Рис. 22.26. Зависимость удельного сопротивления Si при 300 К от концентрации донорных или акцепторных примесей [63]

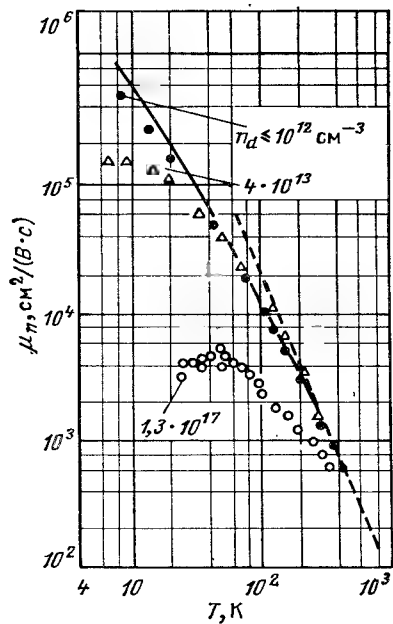


Рис. 22.27. Температурная зависимость подвижности электронов в Si при различной концентрации доноров [64]:

сплошная линия — расчет с учетом фононного рассеяния электронов; пунктир — асимптотическое приближение  $T^{-2,2}$

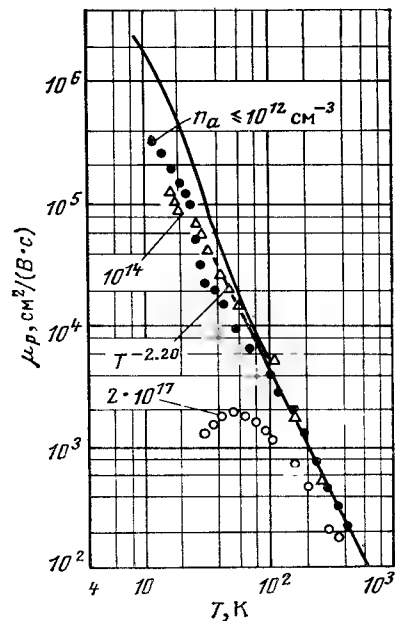


Рис. 22.28. Температурная зависимость подвижности дырок в Si при различной концентрации акцепторов [64]: сплошная линия — расчет с учетом фононного рассеяния дырок



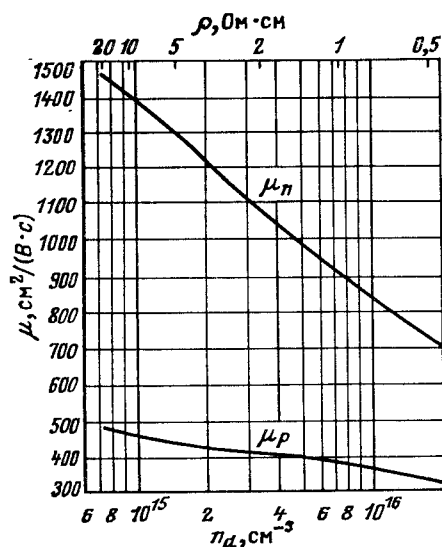


Рис. 22.29. Зависимости подвижностей электронов и дырок в Si при  $T=300$  К от концентрации доноров [226]

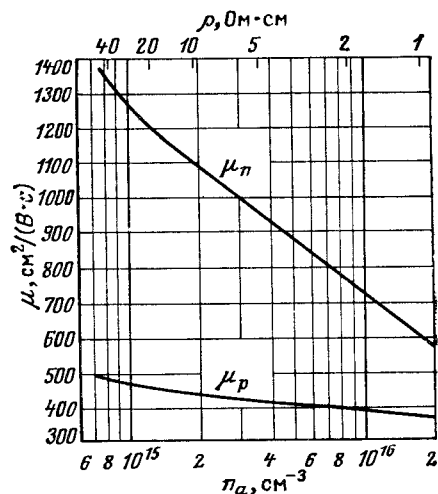


Рис. 22.30. Зависимости подвижностей электронов и дырок в Si при  $T=300$  К от концентрации акцепторов [226]

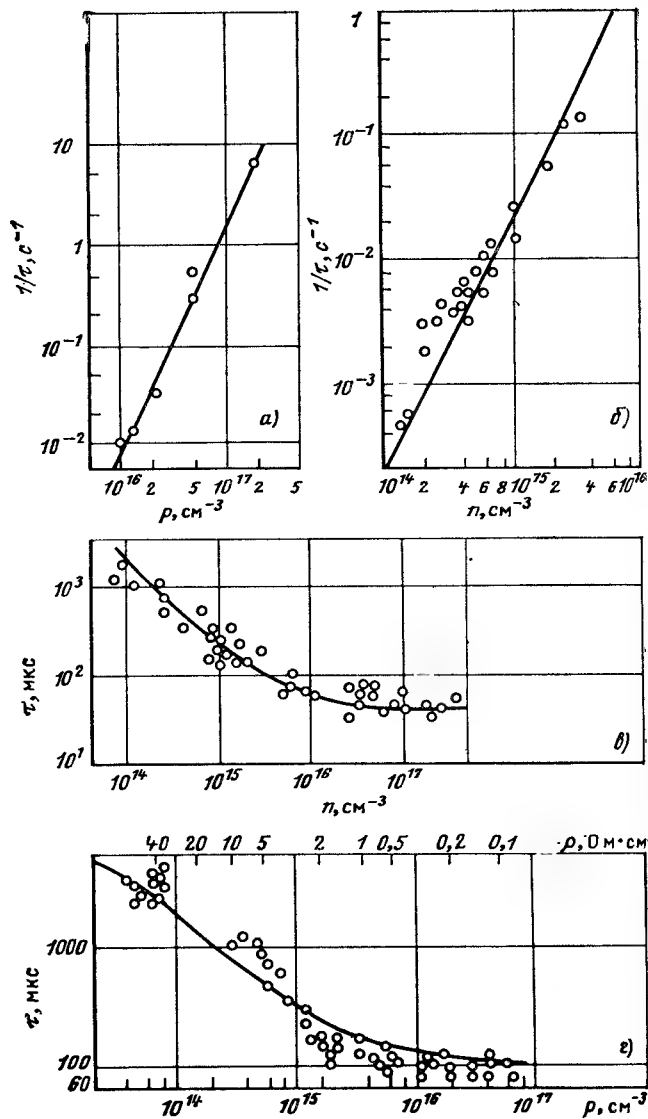


Рис. 22.31. Зависимости времени жизни неосновных носителей в  $n$ -Si (а),  $p$ -Si (б),  $n$ -Ge (в) и  $p$ -Ge (г) от концентрации основных носителей при  $T=300$  К [10, 237]

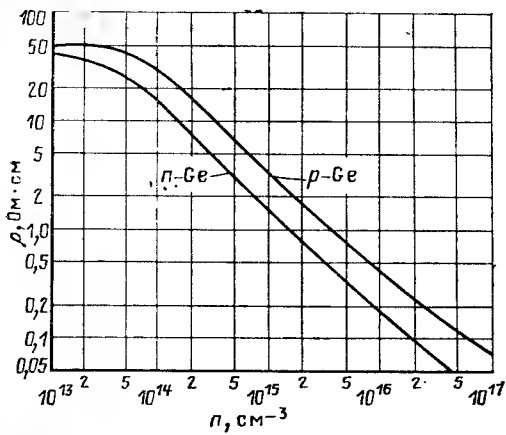


Рис. 22.32. Зависимость удельного сопротивления  $n$ - и  $p$ -Ge от концентрации носителей при  $T=300$  К [234]

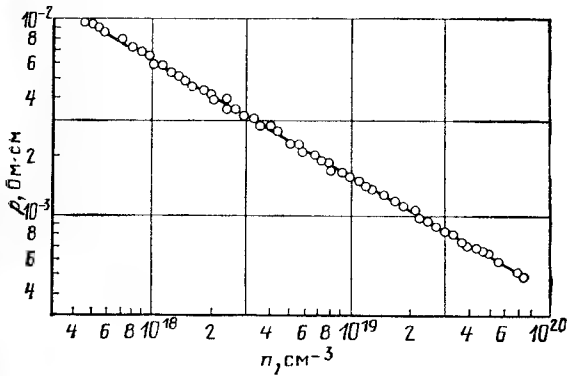


Рис. 22.33. Зависимость удельного сопротивления сильнолегированных кристаллов  $n$ -Ge от концентрации примесей при  $T=300$  К [225]

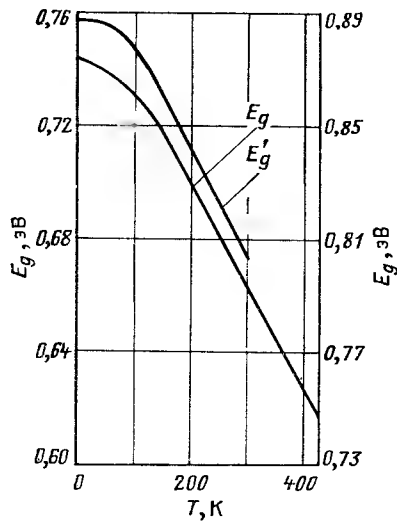


Рис. 22.34. Температурная зависимость энергии прямых  $E_g$  и не прямых  $E_g'$  переходов в Ge [65]

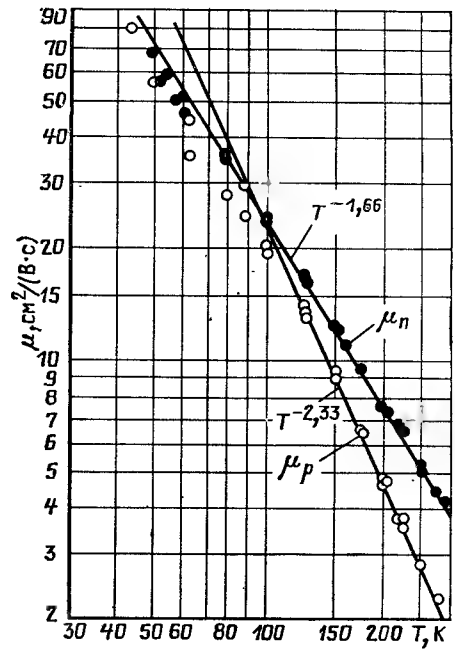


Рис. 22.35. Температурная зависимость подвижности электронов и дырок в чистом Ge при постоянной концентрации носителей [71]

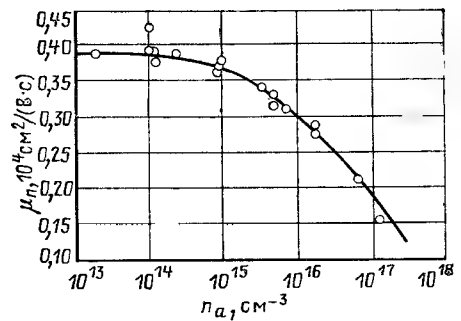


Рис. 22.36. Зависимость дрейфовой подвижности электронов в  $p$ -Ge при  $T=300$  К от концентрации акцепторов: сплошная линия — расчет [72]

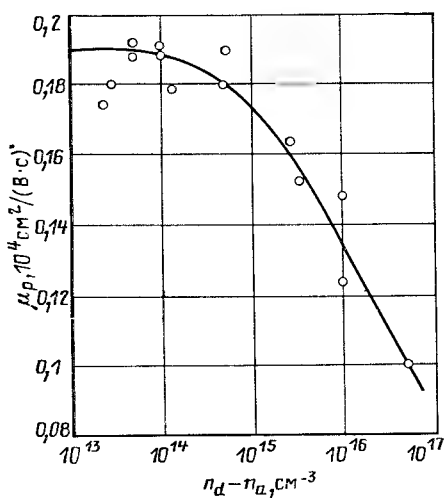


Рис. 22.37. Зависимость дрейфовой подвижности дырок в  $n$ -Ge при  $T=300$  К от концентрации примесей: сплошная линия — расчет [72]

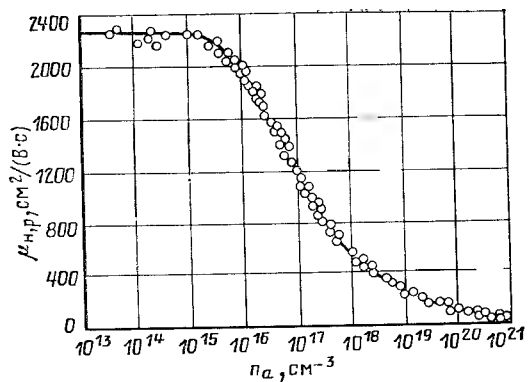


Рис. 22.38. Зависимость холловской подвижности дырок в  $p$ -Ge при комнатной температуре от концентрации акцепторов [73]

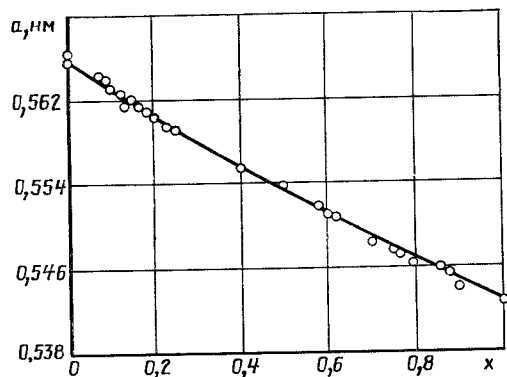


Рис. 22.39. Зависимость постоянной решетки  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  от состава [74]

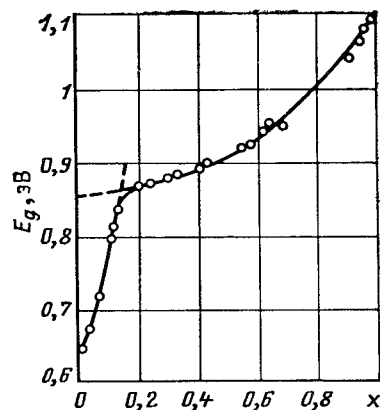


Рис. 22.40. Зависимость ширины запрещенной зоны  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  при  $T=300$  К от состава. При  $x \approx 0,15$  происходит переход от зонной структуры Si к зонной структуре Ge [76]

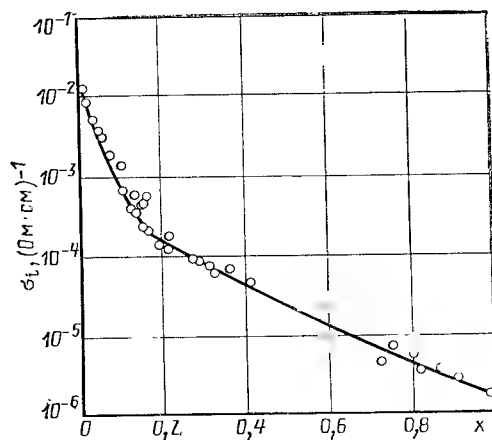


Рис. 22.41. Зависимость собственной проводимости  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  при  $T=300$  К от состава [80]

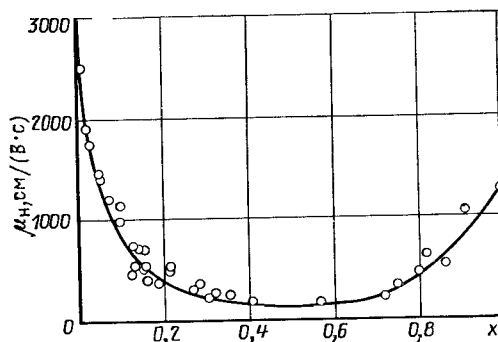


Рис. 22.42. Зависимость холловской подвижности электронов в  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  при  $T=300$  К от состава [80]

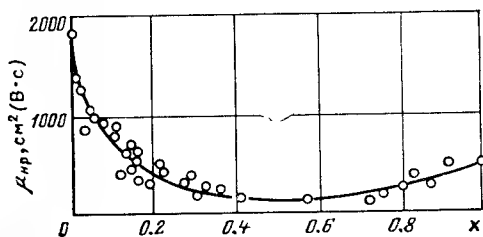


Рис. 22.43. Зависимость холловской подвижности дырок в  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  при  $T = 300 \text{ K}$  от состава [80]

## 22.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

### 22.3.1. Соединения типа $A^{\text{I}}B^{\text{I}}-A^{\text{I}}B^{\text{VII}}$

### 22.3.2. Соединения типа $A^{\text{II}}B^{\text{IV}}-A^{\text{II}}B^{\text{VII}}$

Из соединений типа  $A^{\text{II}}B^{\text{V}}$  наиболее изучены  $\text{ZnSb}$  и  $\text{CdSb}$ , а также их твердые растворы, представляющие интерес при создании термоэлектрических устройств.  $\text{ZnSb}$  и  $\text{CdSb}$  кристаллизуются в орторомбической структуре ( $D_{2h}^{15}$ ), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств. Зонная структура непрямоугольная [18, 117]. Минимум зоны проводимости расположен в

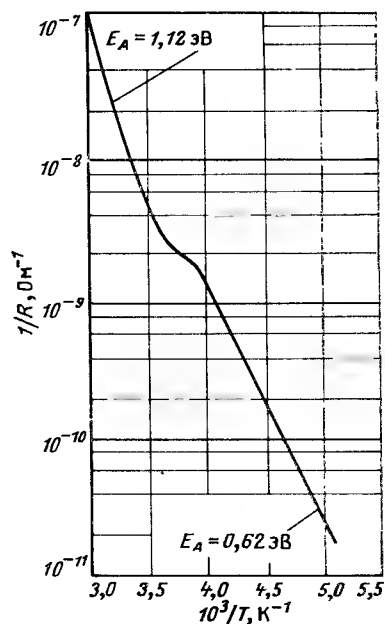


Рис. 22.46. Температурная зависимость сопротивления  $\text{Cs}_3\text{Sb}$  [89]

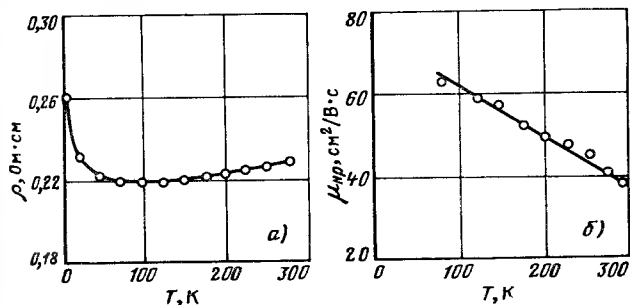


Рис. 22.44. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и холловской подвижности электронов (б) в  $\text{CsAu}$  (пленочный образец толщиной 130 нм) [81]

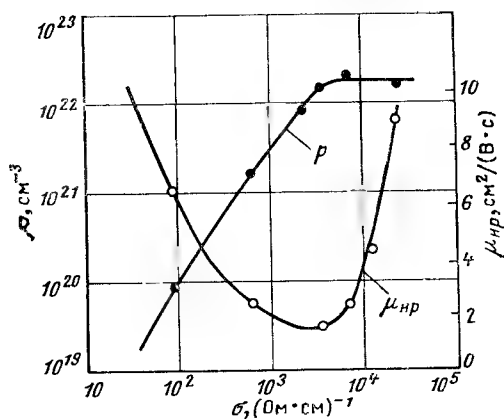


Рис. 22.45. Зависимость холловской подвижности дырок и их концентрации от проводимости пленок  $\text{CsAu}$  толщиной 270 нм с различной степенью окисления [83]

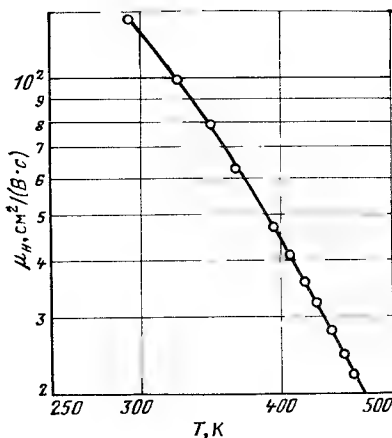


Рис. 22.47. Температурная зависимость подвижности дырок в  $\text{Si}_2\text{O}$  [90]

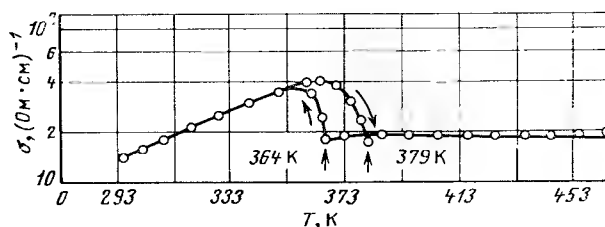


Рис. 22.48. Температурная зависимость проводимости  $\text{Si}_2\text{S}$  [91]: стрелки, обращенные вниз и вверх, — измерения при повышении и понижении температуры соответственно

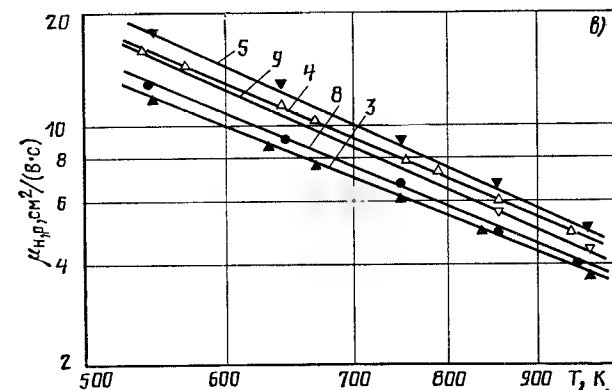
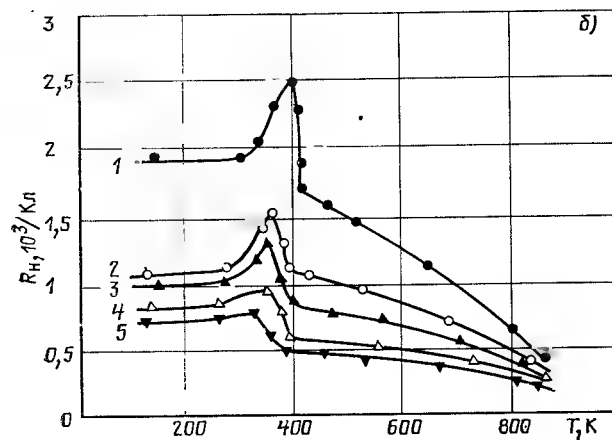
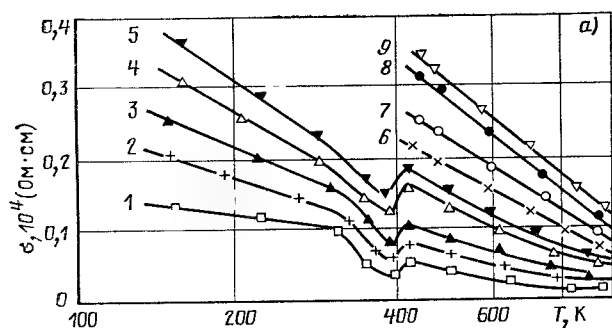


Рис. 22.49. Температурные зависимости электронной проводимости (а), коэффициента Холла (б) и холловской подвижности дырок (в) для различных образцов  $\text{Cu}_2\text{Se}$  [92]:

содержание Se увеличивается от образца 1 к образцу 9, соответственно увеличивается концентрация носителей тока (от  $1,9 \cdot 10^{20}$  до  $24,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ).

Рис. 22.52. Температурная зависимость проводимости  $\text{Ag}_2\text{S}$  [97]: различные точки соответствуют иономально чистым и стехиометрическим образцам (электрохимический контроль отношения  $\text{Ag}/\text{S}$  не проводился); для  $\alpha$ -фазы ( $T < T_{\alpha,\beta}$ ) существенно влияние гермической предыстории различных образцов

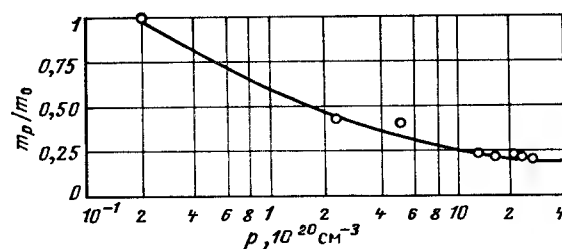


Рис. 22.50. Зависимость эффективной массы дырок в  $\text{Cu}_2\text{Se}$  от их концентрации [93]

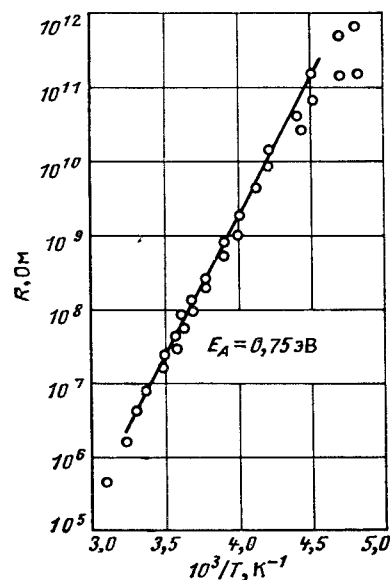
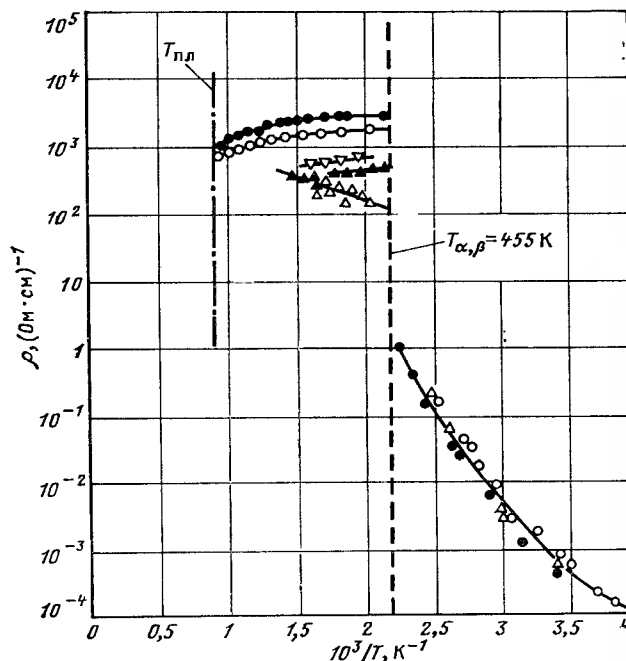


Рис. 22.51. Температурная зависимость сопротивления  $\text{Ag}_2\text{O}$  (пленочный образец) [96]



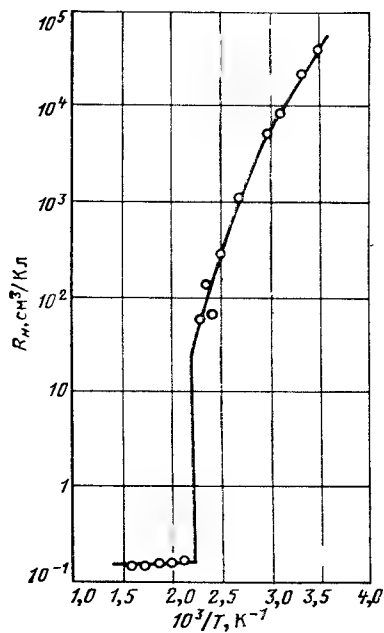


Рис. 22.53. Температурная зависимость коэффициента Холла в  $\text{Ag}_2\text{S}$  [101]

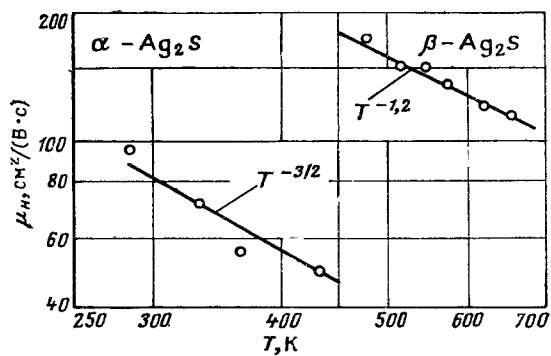


Рис. 22.54. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в  $\alpha$ - и  $\beta$ - $\text{Ag}_2\text{S}$  [101]

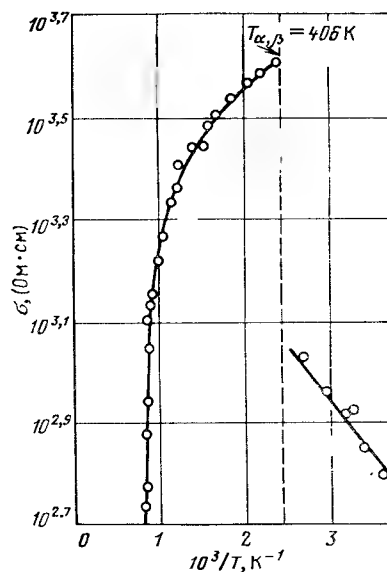


Рис. 22.55. Температурная зависимость проводимости  $\text{Ag}_2\text{Se}$  [97]. При  $T < T_{\alpha,\beta} = 406$  К зависимость имеет полупроводниковый характер, при  $T > T_{\alpha,\beta}$   $d\sigma/dT < 0$

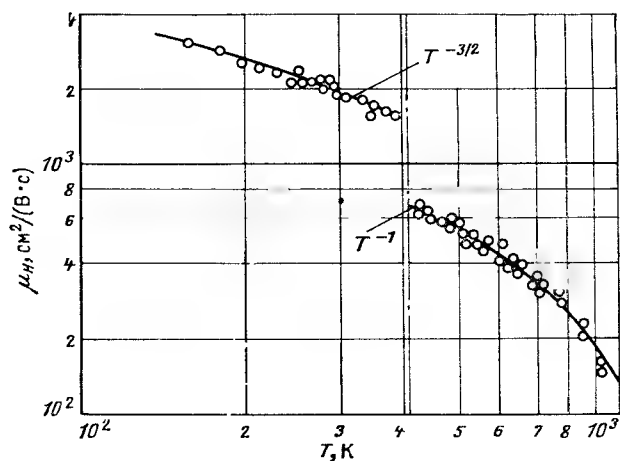


Рис. 22.56. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в  $\text{Ag}_2\text{Se}$  [101]

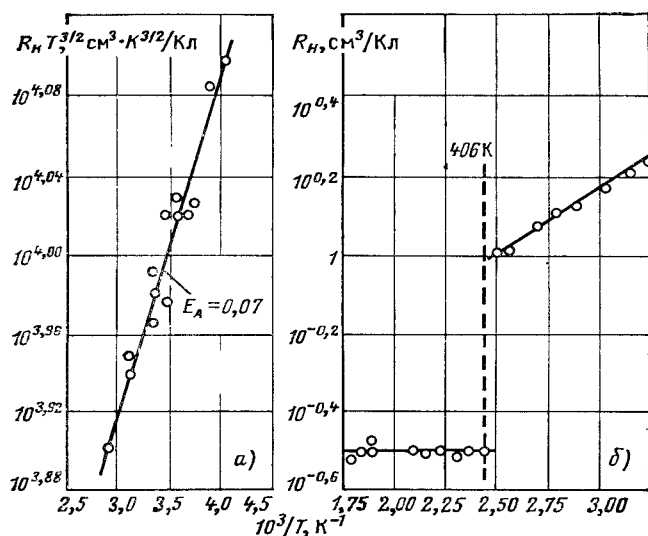


Рис. 22.57. Температурные зависимости коэффициента Холла в различных образцах  $\text{Ag}_2\text{Se}$  при низких (а) и высоких (б) температурах [101]

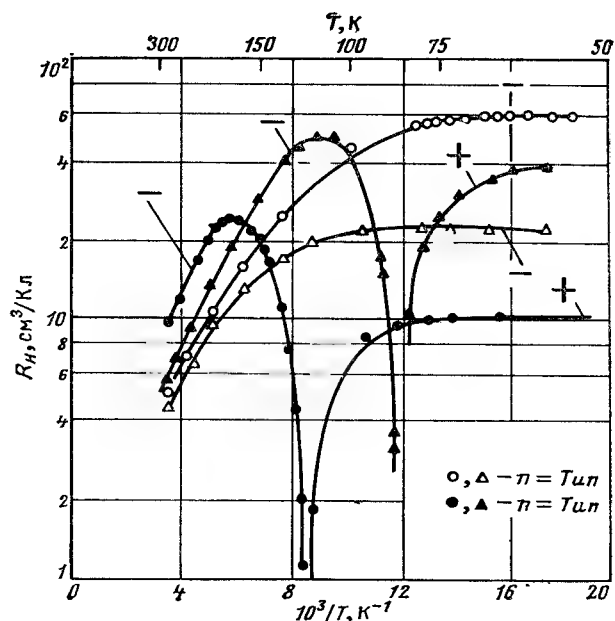


Рис. 22.59. Температурная зависимость коэффициента Холла для различных образцов  $\text{Ag}_2\text{Te}$  [93]:  
—, + — знак ЭДС Холла

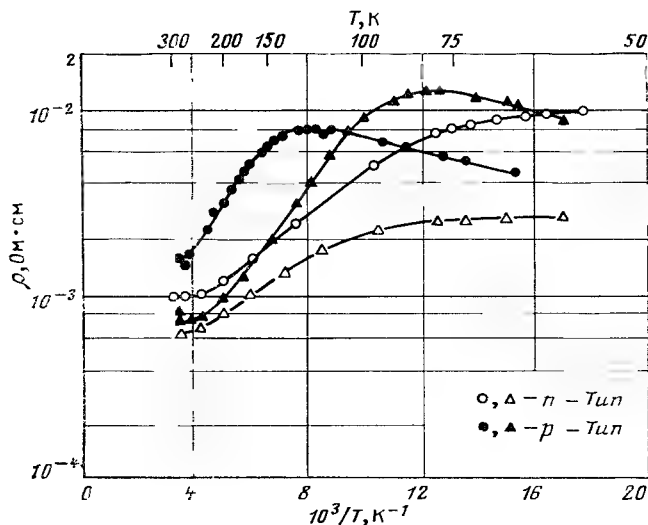


Рис. 22.58. Температурная зависимость удельного сопротивления  $n$ - и  $p$ - $\text{Ag}_2\text{Te}$  [108]:  
образцы те же, что на рис. 22.59

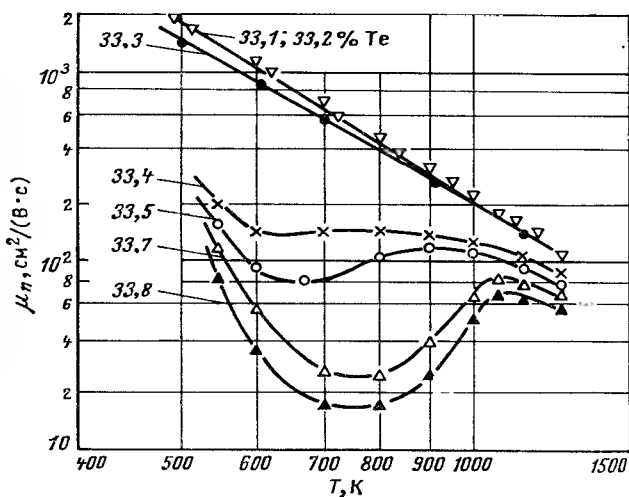


Рис. 22.60. Температурная зависимость подвижности электронов в  $\text{Ag}_2\text{Te}$  [93] при разной концентрации  $\text{Te}$

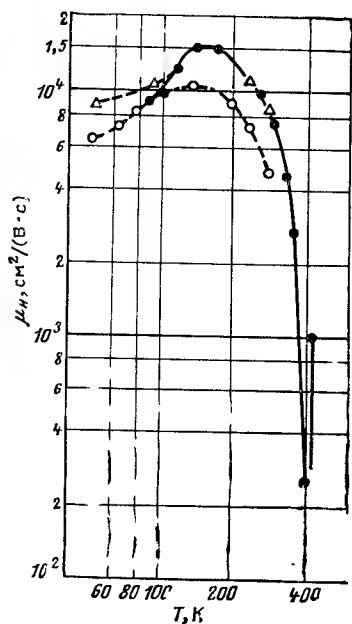


Рис. 22.61. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в  $\text{Ag}_2\text{Te}$  [123]:  
 ○, △ — массивные кристаллы; ● — пленки толщиной 135 нм со сферолитической структурой, напыленные на подложку при температуре 120°C

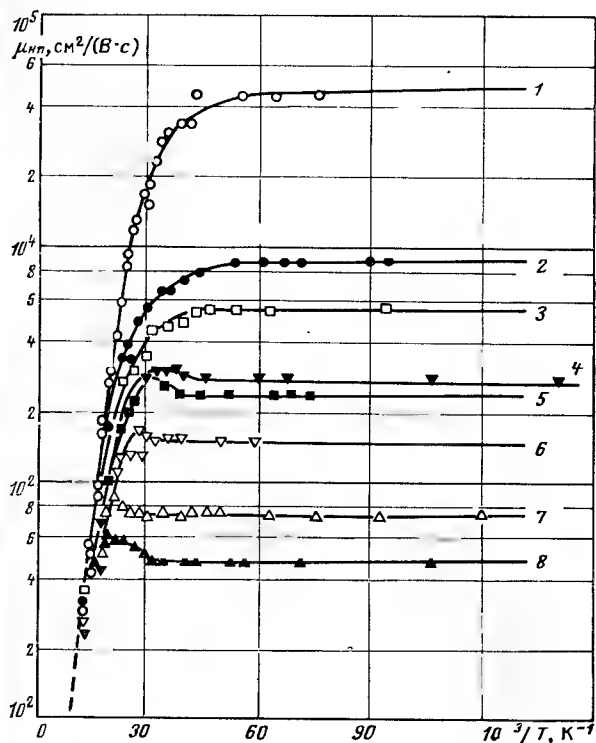


Рис. 22.62. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в чистом и примесных кристаллах  $\text{AgCl}$ :

1 — зонная очистка; 2 — примесь  $\text{Cu}$ ; 3 — примесь  $\text{Fe}$ , различная обработка [109]

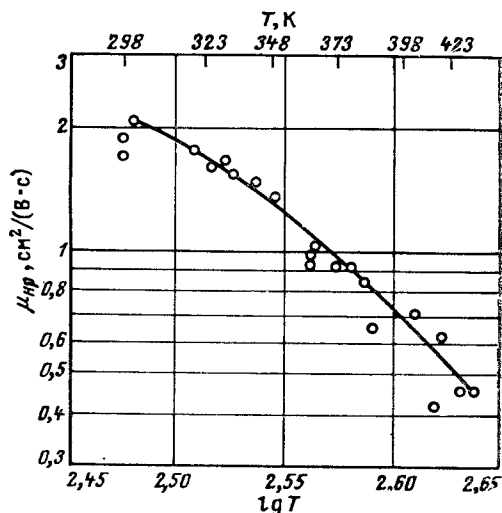


Рис. 22.63. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в  $\text{AgBr}$  [113]

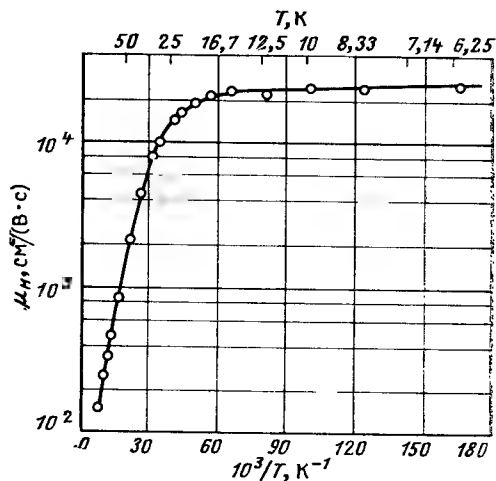


Рис. 22.64. Температурная зависимость подвижности электронов в  $\text{AgBr}$ :

сплошная линия — расчет с учетом рассеяния электронов на акустических и оптических фононах и примесях [119]

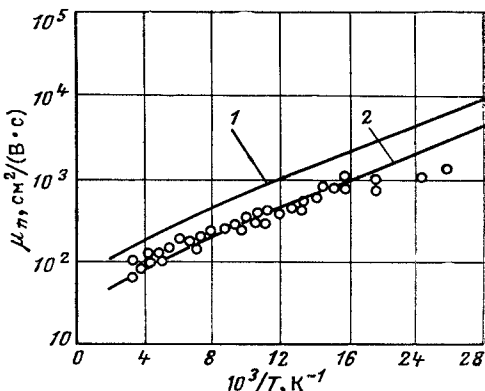


Рис. 22.65. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в  $\text{AgBr}$ :

1 — расчет с использованием измеренной массы полярона; 2 — среднеквадратичная «подгоночная» кривая [120]



Таблица 22.6. Полупроводниковые соединения  $A^I B^V$  [293]

| Соединение                   | Кристаллическая структура |                                                                 | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $E_g$ , эВ                 | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /В·с | $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /В·с |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                              | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                                                  |                            |              |                            |                                |                                |
| $\beta$ -Li <sub>3</sub> Sb  | Куб., $O_h^5$             | 0,656                                                           | 3,29 [288]                 | 923 [288]    | 1,4—1,6 [288]<br>1,25 [16] | —                              | —                              |
| NaSb                         | Моноклин., $C_{2h}^5$     | 0,680 (a);<br>0,634 (b);<br>1,248 (c);<br>$\beta = 117,6^\circ$ | 4,03 [288]                 | 738 [16]     | 0,82 [16]                  | —                              | —                              |
| $\alpha$ -Na <sub>3</sub> Sb | Гекс., $D_{6h}^4$         | 0,536 (a);<br>0,95 (c) [1]                                      | 2,67 [123]                 | 1130 [123]   | 1,1 [123]                  | —                              | —                              |
| KSb                          | Моноклин., $C_{2h}^5$     | 0,718 (a); 0,697 (b);<br>1,340 (c);<br>$\beta = 115,1^\circ$    | 3,52 [288]                 | 878 [16]     | 0,9 [16]                   | —                              | —                              |
| $\alpha$ -K <sub>3</sub> Sb  | Гекс., $D_{6h}^4$         | 0,603 (a);<br>1,069 (c) [1]                                     | 2,35 [123]                 | 1085 [123]   | 1,1 [123]                  | —                              | —                              |
| $\beta$ -Rb <sub>3</sub> Sb  | Куб., $O_h^5$             | 0,884                                                           | —                          | 1006         | 1,0 [10]                   | —                              | —                              |
| CsSb                         | Орторомб., $D_2^4$        | 0,757 (a);<br>0,734 (b); 1,327 (c)                              | —                          | 856          | 0,8 [10]<br>0,6 [288]      | 500 [16]<br>( $T^{-3/2}$ )     | 100 [16]                       |
| Cs <sub>3</sub> Sb           | Куб., $O_h^5$             | 0,914 [1]                                                       | 4,40 [288]                 | 998          | 1,6 [123]                  | 500 [10]<br>( $T^{-3/2}$ )     | 10 [10]<br>200—600 [288]       |
| $\beta$ -Cs <sub>3</sub> Bi  | То же                     | 0,931                                                           | 4,92 [288]                 | 908          | 0,55 [16]                  | —                              | 350 [288]                      |

Таблица 22.7. Полупроводниковые соединения  $A^I B^{IV}$  [293]

| Соединение                   | Кристаллическая структура |                                                               | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К             | $E_g$ , эВ            | $\partial E_g / \partial T$ ,<br>10 <sup>-4</sup> эВ/К |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------|
|                              | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                                                |                            |                          |                       |                                                        |
| Cu <sub>2</sub> O            | Куб., $O_h^4$             | 0,426 [1]                                                     | 6,1 [123]                  | 1508 [16]                | 2,17 (4,2 К)          | -2 [10]                                                |
| $\alpha$ -Cu <sub>2</sub> S  | Ромб., $C_{2v}^{15}$      | 1,18 (a); 2,728 (b);<br>1,349 (c)                             | 5,6 [216]<br>5,8 [288]     | 1393 [288]<br>1373 [216] | 1,3                   | —                                                      |
| $\alpha$ -Cu <sub>2</sub> Se | Куб., $O_h^5$             | 0,575 [288]                                                   | 6,8 [216]<br>7,1 [288]     | 1390 [216]<br>1398 [288] | 1,25 [94]             | —                                                      |
| Cu <sub>2</sub> Te           | Гекс., $D_{4h}^7$         | 0,396 (a); 0,612 (c)                                          | 7,34 [216]                 | 1173 [216]               | 0,5                   | -3                                                     |
| Ag <sub>2</sub> O            | Куб., $O_h^4$             | 0,472                                                         | 6,9                        | 1361                     | 1,2                   | -20                                                    |
| $\alpha$ -Ag <sub>2</sub> S  | Моноклин.                 | 0,423 (a); 0,691 (b);<br>0,787 (c);<br>$\beta = 99^\circ 35'$ | 7,23                       | 1098                     | 1,0 [16]<br>1,3 (0 К) | -12                                                    |
| $\beta$ -Ag <sub>2</sub> S   | Куб., $O_h^9$             | 0,488 [288]                                                   | 7,2 [288]<br>6,7           | 859 [288]                | —                     | —                                                      |
| $\beta$ -Ag <sub>2</sub> Se  | То же                     | 0,499                                                         | 8,25<br>7,58 [288]         | 1170 [16]                | 0,15                  | —                                                      |
| AgTe                         | Ромб.                     | 0,890 (a); 2,01 (b);<br>0,462 (c) [288]                       | 7,61 [288]                 | 483 [288]                | 0,73 [288]            | —                                                      |
| $\alpha$ -Ag <sub>2</sub> Te | Моноклин., $C_{2h}^1$     | 0,818 (a); 0,448 (b);<br>0,809 (c)                            | 8,41                       | [216]*                   | 0,67                  | -0,86 [102]                                            |
| $\beta$ -Ag <sub>2</sub> Te  | Куб., $O_h^5$             | 0,658                                                         | 8,5 [216]<br>7,6 [288]     | 1228 [216]<br>963 [288]  | 0,2                   | —                                                      |

| Соединение                   | $T_D$ , К           | $m_n/m_0$              | $m_p/m_0$             | $\mu_n$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $\mu_p$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $\epsilon_0$ | $\epsilon_\infty$ | $n_i$ , см <sup>-3</sup> |
|------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------|
| Cu <sub>2</sub> O            | 188                 | 0,98                   | 0,58                  | 0,1 [288]                             | 100 [123]                             | 7,5 [23]     | —                 | —                        |
| $\alpha$ -Cu <sub>2</sub> S  | 300 [288]           | —                      | 1,8                   | 3,0 [242]                             | 5,0                                   | —            | —                 | —                        |
| $\alpha$ -Cu <sub>2</sub> Se | 235 [288]           | —                      | 0,5                   | —                                     | 1400 [288]<br>750 [16]                | 9 [288]      | 11,6              | —                        |
| Cu <sub>2</sub> Te           | 220 [288]           | 0,9 [288]              | 0,8                   | 200 [40]<br>400 [288]                 | 900 [88]<br>( $T=3,2$ )               | —            | 17 [288]          | —                        |
| Ag <sub>2</sub> O            | —                   | 0,7                    | 1,9                   | —                                     | —                                     | —            | —                 | —                        |
| $\alpha$ -Ag <sub>2</sub> S  | 70                  | 4,55 ( $m_d$ )<br>[15] | 7,8 ( $m_d$ )<br>[15] | 63                                    | 18                                    | —            | —                 | 3,7 · 10 <sup>15</sup>   |
| $\beta$ -Ag <sub>2</sub> S   | 160 [288]           | 0,24 [288]             | —                     | 60—120<br>[288]                       | —                                     | —            | —                 | —                        |
| $\beta$ -Ag <sub>2</sub> Se  | 190 [80 K]          | 0,2                    | 0,54                  | 2000 [16]                             | 520                                   | —            | —                 | 3,2 · 10 <sup>18</sup>   |
| AgTe                         | —                   | —                      | —                     | —                                     | 200 [288]                             | —            | —                 | —                        |
| $\alpha$ -Ag <sub>2</sub> Te | 150 (80 K)<br>[288] | 0,026—0,034            | —                     | 10 000                                | 1000                                  | —            | 16 [288]          | —                        |
| $\beta$ -Ag <sub>2</sub> Te  | 120 [288]           | 0,11                   | 1,5                   | 1100<br>4000 [16]                     | 18                                    | —            | —                 | —                        |

\* При  $T < 423$  К переходит в  $\beta$ -Ag<sub>2</sub>Te [16].Таблица 22.8. Полупроводниковые соединения  $A^I B^{VII}$ 

| Соединение    | Кристаллическая структура |             | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К                                                                                | $E_g$ , эВ             | $\mu_n$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В · с)             | $\mu_p$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $m_n/m_0$                | $m_p/m_0$<br>[290] | $\epsilon_0$ [290] | $\epsilon_\infty$ [290] | $T_D$ , К [290] |
|---------------|---------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-----------------|
|               | Система, группа           | $a$ , нм    |                            |                                                                                             |                        |                                                   |                                       |                          |                    |                    |                         |                 |
| CuBr          | Куб., $T_d^2$             | 0,568 [1]   | 4,72 [121]                 | 750 [290]                                                                                   | 2,9 [16]<br>3,08 [290] | 30 [16]                                           | —                                     | 0,28 [290]               | 1,4                | 8,6                | 4,06                    | 163             |
| $\gamma$ -CuI | Куб., $O_h^5$             | 0,604 [290] | 6,67 [290]                 | 642<br>( $\gamma \rightarrow \beta$ )<br>681<br>( $\beta \rightarrow \alpha$ )<br>875 [290] | 3,1 [238]              | —                                                 | —                                     | 0,33 [290]               | 1,4<br>2,4         | 6,5                | 4,6                     | 165             |
| AgCl          | То же                     | 0,555 [290] | 5,56 [216]                 | 728 [216]                                                                                   | 3,0 [242]<br>4,1 [11]  | 70 (200 K)<br>45 000 [109]<br>(12 K)              | 40 (200 K)<br>[11]                    | 0,30 [290]<br>0,36 [109] | —                  | 11,1               | 3,9                     | 161             |
| AgBr          | » »                       | 0,577 [1]   | 6,47 [216]                 | 703 [216]                                                                                   | 2,0 [78]               | 240 [10]<br>4000 [123]<br>600 000 [82]<br>(1,7 K) | 2 [290]<br>30 000<br>(4,2 K)          | 0,29 (291)               | —                  | 12,4               | 4,6                     | 120             |
| AgI           | Куб., $T_d^2$             | 0,647 [1]   | 5,67 [121]                 | 825 [121]                                                                                   | 2,8 [10]               | 50 [16]                                           | —                                     | —                        | —                  | 7,0                | 4,1                     | 114             |

Таблица 22.9. Полупроводниковые соединения  $A^{II} B^{IV}$ 

| Соединение          | Кристаллическая структура, $a$ нм [123] | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> [123] | $T_{пл}$ , К [123] | $E_g$ , эВ [293]   | $\partial E_g / \partial T$ , 10 <sup>-4</sup> эВ/К | $T_D$ , К [293] |
|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------|
| Mg <sub>2</sub> Si* | 0,634                                   | 1,95                             | 1375               | 0,78 (0 K)         | —6,4 [131]                                          | 450             |
| Mg <sub>2</sub> Ge* | 0,639 [293]                             | 3,086                            | 1388               | 0,57 [67]          | —1,8 [67]                                           | 363             |
| Mg <sub>2</sub> Sn* | 0,676                                   | 3,592                            | 1051               | 0,23<br>0,36 (0 K) | —3,5 [293]                                          | 240             |
| Mg <sub>2</sub> Pb* | 0,686 [293]                             | 5,54 [293]                       | 828 [293]          | 0,15               | —                                                   | 244             |

| Соединение               | $m_n/m_0$                                                                   | $m_p/m_0$                        | $\mu_n^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $\mu_p^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $\epsilon_0$ | $\epsilon_\infty$ | $n_i$<br>см <sup>-3</sup> [293] |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|-------------------|---------------------------------|
| Mg <sub>2</sub> Si       | 0,46 ( $m_d$ ) [75]                                                         | 0,87 [10]<br>2,0 [288]           | 550 [293]                             | 70 [123]                              | 18,8 [293]   | 13,3 [293]        | 10 <sup>14</sup>                |
| Mg <sub>2</sub> Ge       | 0,18 ( $m_d$ ) [55]                                                         | 0,31 [10]                        | 530 [293]<br>4335 (77 K)              | 110<br>1180 (77 K) [293]              | 21,7 [293]   | 13,9 [293]        | 2 · 10 <sup>14</sup>            |
| Mg <sub>2</sub> Sn       | 0,8 ( $m_{  }$ ) [133]<br>0,3 ( $m_{\perp}$ ) [133]<br>1,17 ( $m_d$ ) [293] | 1,28 [10]                        | 320 ( $T^{-2,2}$ )<br>[123]           | 260 [123]<br>( $T^{-2,2}$ )           | 23,75 [219]  | 15,5 [219]        | 2,7 · 10 <sup>17</sup>          |
| Mg <sub>2</sub> Pb [293] | —                                                                           | 0,35 ( $m_p$ )<br>0,04 ( $m_n$ ) | 12 000 (4,2 K)                        | 14 000                                | —            | —                 | —                               |

\* Куб.,  $O_h^5$ .Таблица 22.10. Полупроводниковые соединения  $A^{II}B^V$  [293]

| Соединение                                | Кристаллическая структура |                                                                     | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К            | $E_g$ , эВ                 | $\partial E_g / \partial T$ ,<br>10 <sup>-4</sup> эВ/К |
|-------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|
|                                           | Система, группа           | $a$ , $b$ , $c$ , нм                                                |                            |                         |                            |                                                        |
| Mg <sub>3</sub> As <sub>2</sub>           | Куб.                      | 1,233                                                               | —                          | 1073                    | 2,6                        | —9                                                     |
| Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>           | Триг., $D_{3d}^3$         | 0,454 ( $a$ ); 0,723 ( $c$ ) [1]                                    | 4,09 [123]                 | 1500 [123]              | 0,82 [151]                 | —                                                      |
| $\alpha$ -Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>  | Тетр., $D_4^4$            | 0,508 ( $a$ ); 1,859 ( $c$ )                                        | 3,54                       | 1258<br>1313 [288]      | 2,18<br>2,0 [288]          | —5,5                                                   |
| $\beta$ -ZnP <sub>2</sub>                 | Моноклин., $C_{2h}^5$     | 0,885 ( $a$ ); 0,729 ( $b$ ); 0,756 ( $c$ )                         | 3,55                       | 1265                    | 1,37                       | —                                                      |
| Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>            | Тетр., $D_{4h}^{15}$      | 0,81 ( $a$ ); 1,145 ( $c$ ) [2]                                     | 4,54 [16]                  | 1466                    | 1,15 [10]                  | —                                                      |
| ZnAs <sub>2</sub>                         | Моноклин., $C_{2h}^5$     | 0,921 ( $a$ ); 0,764 ( $b$ ); 0,798 ( $c$ );<br>$\beta = 102' 28''$ | 4,94                       | 1041 [133]              | 0,92 [16]                  | —                                                      |
| Zn <sub>3</sub> As <sub>2</sub>           | Тетр., $D_{4h}^{15}$      | 1,178 ( $a$ ); 2,364 ( $c$ )                                        | 5,58 [123]                 | 1288                    | 1,0 (0 K)                  | —4,55                                                  |
| ZnSb                                      | Орторомб., $D_{2h}^{15}$  | 0,622 ( $a$ ); 0,774 ( $b$ ); 0,812 ( $c$ );<br>[117]               | 6,38 [117]                 | 819 [117]               | 0,5; 0,61<br>(4,2 K) [103] | —                                                      |
| $\beta$ -Zn <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub>  | Моноклин., $C$            | 1,074 ( $a$ ); 1,22 ( $b$ ); 0,820 ( $c$ )                          | 6,81                       | 836                     | 1,2 [16]                   | —                                                      |
| CdP <sub>4</sub>                          | Моноклин., $C_{2h}^5$     | 0,527 ( $a$ ); 0,519 ( $b$ ); 0,766 ( $c$ );<br>$\beta = 80' 32''$  | 2,04<br>3,90 [288]         | —                       | 1,0 [111]                  | —(2,7—3,7)                                             |
| $\beta$ -CdP <sub>2</sub>                 | Тетр., $D_{4h}^{15}$      | 0,529 ( $a$ ); 1,974 ( $c$ )                                        | 4,19                       | 1057                    | 2,02                       | —8,6                                                   |
| Cd <sub>3</sub> P <sub>2</sub>            | Тетрагон., $D_{4h}^{15}$  | 1,256 ( $a$ ); 2,544 ( $c$ )                                        | 5,60 [123]                 | 970 [123]<br>1015 [288] | 0,55 [54]                  | —1,8                                                   |
| CdAs <sub>2</sub>                         | Тетрагон., $D_4^{10}$     | 0,795 ( $a$ ); 0,468 ( $c$ )                                        | 5,88<br>5,64 [288]         | 894 [133]               | 1,13 [16]<br>1,0 [15]      | —                                                      |
| $\alpha$ -Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> | Тетрагон., $C_{4v}^{12}$  | 1,265 ( $a$ ); 2,544 ( $c$ )                                        | 6,25 [123]                 | 994 [133]               | 0,12 (0 K)                 | —3,3                                                   |
| CdSb                                      | Орторомб., $D_{2h}^{15}$  | 0,647 ( $a$ ); 0,824 ( $b$ ); 0,853 ( $c$ )<br>[117]                | 6,92 [117]                 | 729 [133]               | 0,56 [117]                 | —5,4 [117]                                             |
| $\beta$ -Cd <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub>  | Моноклин., $D_{2h}^{13}$  | 0,815 ( $a$ ); 0,816 ( $b$ ); 1,196 ( $c$ )                         | —                          | 703                     | 1,25 [16]                  | —5,4 [288]<br>—3,6                                     |

| Соединение                               | $T_D$ , К    | $m_n/m_0$                | $m_p/m_0$                | $\mu_n^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $\mu_p^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $\epsilon_0$ |
|------------------------------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Mg <sub>3</sub> As <sub>2</sub>          | —            | —                        | —                        | 10—20                                 | —                                     | —            |
| Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>          | —            | 3,1 ( $m_d$ )            | —                        | —                                     | 100 ( $\sim T^{-3,2}$ ) [10]          | —            |
| $\alpha$ -ZnP <sub>2</sub>               | 465 [288]    | —                        | —                        | 1800                                  | —                                     | —            |
| $\beta$ -ZnP <sub>2</sub> *1             | 288 [288]    | —                        | —                        | 3,5                                   | 20 [288]                              | —            |
|                                          |              |                          |                          |                                       | 1000 (77 К) [288]                     | —            |
| Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub> *2        | 320          | —                        | —                        | —                                     | 100 [288]                             | —            |
|                                          | 369 (160 К)  | —                        | —                        | —                                     | 20                                    | —            |
| ZnAs <sub>2</sub>                        | 234          | 0,35 [288]               | 2,45 [288]               | 500                                   | 100                                   | 12—15        |
|                                          | 284 (55 К)   | —                        | —                        | —                                     | —                                     | —            |
| Zn <sub>3</sub> As <sub>2</sub>          | 290          | 1,7 [16]                 | 0,65 [16]                | $10 \cdot (T/300)^{-1,1}$             | 17 ( $\sim T^{-1,64}$ ) [16]          | 11,8         |
|                                          | 275 (120 К)  | —                        | —                        | [135]                                 | —                                     | —            |
| ZnSb*3                                   | 225          | 0,175 ( $m_{  }$ ) [117] | 0,53 [18]                | 800 (100 К)                           | 700 ( $\sim T^{-3/2}$ ) [50]          | —            |
|                                          | (80 К) [117] | 0,146 ( $m_{\perp}$ )    | —                        | —                                     | —                                     | —            |
| $\beta$ -Zn <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub> | —            | 0,16 [288]               | 0,12                     | 330                                   | 980 [16]                              | —            |
| CdP <sub>4</sub>                         | —            | —                        | —                        | 150 [111]                             | 600 [288]                             | —            |
| $\beta$ -CdP <sub>2</sub>                | —            | —                        | —                        | —                                     | —                                     | —            |
| Cd <sub>3</sub> P <sub>2</sub> *4        | 251          | 0,09 [77]                | 0,5                      | 3000 ( $T^{-1,1}$ ) [54];             | —                                     | 37           |
|                                          | 235 (55 К)   | 0,05 [188]               | —                        | $5 \cdot 10^4$ (4,2 К)                | —                                     | —            |
|                                          |              | $g_n = 2,15$             | —                        | —                                     | —                                     | —            |
| CdAs <sub>2</sub> *5                     | 233 (55 К)   | 0,15 ( $m_{  }$ ) [133]  | 0,094 ( $m_{  }$ ) [133] | 100—400 [133]                         | 400 [133]                             | 15,4—17,4    |
|                                          |              | 0,58 ( $m_{\perp}$ )     | 0,346 ( $m_{\perp}$ )    | 3000 [288]                            | —                                     | —            |
|                                          |              | 0,37 ( $m_d$ )           | 0,22 ( $m_d$ )           | —                                     | —                                     | —            |

| Соединение                                   | $T_D$ , К           | $m_n/m_0$                                     | $m_p/m_0$        | $\mu_n^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с)          | $\mu_p^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с) | $\epsilon_0$ | $\epsilon_{\infty}$ |
|----------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|
| $\alpha$ -Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> *6 | 258 [288]           | 0,046 ( $m_d$ );<br>$g_n = 17 \div 30,2$ [52] | 0,12             | $2,6 \cdot 10^4$ ;<br>$2,8 \cdot 10^4$ (4,2 К) | 430 [16]                              | 42           | 16                  |
| CdSb                                         | 180 (80 К)<br>[117] | 0,72                                          | 0,34—0,4<br>1,07 | 660                                            | 2000 [117]<br>( $\sim T^{-3/2}$ )     | 16,4         | —                   |
| $\beta$ -Cd <sub>4</sub> Sb <sub>3</sub>     | —                   | 0,1—0,2 [288]                                 | 0,35 [288]       | 1000 [288]                                     | 110<br>900 [288]                      | —            | —                   |

\*1 Анизотропия сопротивления  $\rho_a : \rho_b : \rho_c = 5 : 35 : 1$ .\*2  $n_i = 3,56 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>.\*3  $n_i = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.\*4  $\epsilon_{\infty} = 14 \div 17$ .\*5  $\epsilon_{\infty} = 11,5 \div 13,8$ .\*6  $\epsilon_{\infty} = 16$ .Таблица 22.11. Параметры валентной зоны соединений типа  $A^{II}B^{VI}$  [138, 289]

| Соединение | $\Delta_{so}$ , эВ | $\Delta_{cr}$ , эВ | $E_1$ , эВ | $E_2$ , эВ | Соединение | $\Delta_{so}$ , эВ | $\Delta_{cr}$ , эВ | $E_1$ , эВ  | $E_2$ , эВ  |
|------------|--------------------|--------------------|------------|------------|------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|
| Сфалерит   |                    |                    |            |            | Вюрцит     |                    |                    |             |             |
| ZnS        | 0,06—0,07          | —                  | —          | —          | ZnO        | —                  | —                  | 0,007 [159] | 0,052 [159] |
| ZnSe       | 0,43               | —                  | —          | —          | ZnS        | 0,092              | 0,055              | 0,029       | 0,117       |
| ZnTe       | 0,9—0,96           | —                  | —          | —          | CdS        | 0,065              | 0,027              | 0,015       | 0,025       |
| CdTe       | 0,8—0,9            | —                  | —          | —          | CdSe       | 0,42               | 0,041              | 0,078       | 0,433       |
| HgSe       | 0,40—0,45          | —                  | —          | —          |            |                    |                    |             |             |
| HgTe       | 0,94—1,1           | —                  | —          | —          |            |                    |                    |             |             |

Таблица 22.12. Полупроводниковые соединения  $A^{II}B^{VI}$

| Соединение    | Кристаллическая структура |                                                   | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $E_g$ , эВ                                                            | $\partial E_g / \partial T$ ,<br>10 <sup>-4</sup> эВ/К |
|---------------|---------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|               | Система, группа           | $a$ , $c$ , нм                                    |                            |              |                                                                       |                                                        |
| ZnO           | Гекс., $C_{6v}^4$         | Вюрцит*1, 0,325 ( $a$ );<br>0,591 ( $c$ ) [290]   | 5,60 [121]<br>5,66 [123]   | 2248 [123]   | 3,35 [144]<br>3,43 [66]                                               | -8 [144]                                               |
| ZnS           | Куб., $T_d^2$             | Сфалерит*2, 0,541 ( $a$ ) [138]                   | 4,10 [140]                 | 2103 [236]   | 3,54*3 [123]<br>3,6 [114]<br>3,67 ( $w$ ) [138]<br>3,91 ( $w$ ) [123] | -5,3*3 [114]<br>-3,8 ( $w$ )                           |
| ZnSe          | То же                     | Сфалерит, 0,5668 ( $a$ ) [138]                    | 5,42 [121]                 | 1788 [123]   | 2,7 [114]<br>2,8 [138]                                                | -4,5 [289]                                             |
| ZnTe          | » »                       | Сфалерит, 0,6104 ( $a$ ) [138]                    | 5,68 [141]                 | 1512 [123]   | 2,1 [47]<br>2,34 [142]                                                | -4,1 [289]<br>-5 [290]                                 |
| CdO           | Куб., $O_h^5$             | 0,470 [1]                                         | 8,15 [216]                 | 1099 [288]   | 2,3 [123]<br>2,68 [59]                                                | -6 [59]                                                |
| CdS           | Гекс., $C_{6v}^3$         | Вюрцит*1, 0,4136 ( $a$ );<br>0,6713 ( $c$ ) [138] | 4,82 [139]                 | 2023 [123]   | 2,52*3 [142]<br>2,4 ( $s$ ) [214]                                     | -4,4 [138]                                             |
| CdSe          | То же                     | Вюрцит*1, 0,430 ( $a$ );<br>0,701 ( $c$ ) [138]   | 5,81 [139]                 | 1531 [123]   | 1,67 [138]<br>1,8 [114]                                               | -4,6 [144]                                             |
| CdTe          | Куб., $T_d^2$             | Сфалерит, 0,648 ( $a$ ) [138]                     | 5,86 [139]<br>6,20 [121]   | 1371 [123]   | 1,5 [237]<br>1,6 (77 К)                                               | -3,0 [68]<br>-5,6 [288]                                |
| $\alpha$ -HgS | Триг., $D_3^6$            | 0,414 ( $a$ ); 0,949 ( $c$ ) [288]                | 8,09 [288]                 | 618 [288]    | 2,1 [290]                                                             | —                                                      |
| $\beta$ -HgS  | Куб., $T_d^2$             | 0,585 ( $a$ ) [290]                               | 7,73 [290]                 | 1098 [288]   | 0,15 [289]                                                            | —                                                      |
| HgSe          | То же                     | 0,608 ( $a$ ) [138]                               | 8,26 [139]                 | 1071 [123]   | 0,2 [148];<br>0,22 [156];                                             | 5 [289]                                                |
| HgTe          | » »                       | 0,646 ( $a$ ) [138]                               | 8,09 [289]                 | 943 [123]    | 0,115 [33]<br>0,250 (77 К) [33];<br>0,302 (4,2 К) [38]                | 7 [289]                                                |

| Соединение    | $\varepsilon_n$                                                | $\varepsilon_p^{*4}$                                        | $T_D$ , К                        | $\hbar\omega_I$ , эВ        | $\hbar\omega_{II}$ , эВ        | $\langle \varepsilon_0 \rangle^{*5}$    | $\langle \varepsilon_{\infty} \rangle^{*5}$ |
|---------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| ZnO           | -1,94 [155]                                                    | -(1,24—1,74) [155]                                          | 416 [141]                        | 0,0732 [254]<br>0,605 [220] | 0,0512 [254]<br>0,0545 [220]   | 8,5 [159]                               | 4,0 [159]                                   |
| ZnS           | 1,88 [289]<br>2,0 (   $c$ ) ( $w$ )<br>2,3 ( $\perp c$ ) [138] | 1,04 [148]                                                  | 310 [140]                        | 0,044 [138]                 | 0,0367 [138]<br>0,0394 ( $w$ ) | 8,54 [289]<br>8,32 [138]                | 5,2 [289]<br>5,13 [138]                     |
| ZnSe          | 1,46 [148]<br>1,14—1,37 [289]                                  | ~1,5 [289]<br>5,25 [148]                                    | 400 (80 К) [144]                 | 0,031 [138]                 | 0,0263 [138]                   | 9,1 [138]<br>9,73 [289]                 | 5,9 [138]<br>7,18 [289]                     |
| ZnTe          | —0,38 [289]<br>—0,57                                           | 0,9—1,1 [289]                                               | 250 (80 К) [114]                 | 0,026 [138]                 | 0,024 [138]<br>0,0219 [254]    | 10,1 [138]<br>9,67 [142]                | 7,28 [138]<br>8,26 [114]                    |
| CdO           | 1,81 [201]                                                     | —                                                           | 415 [288]                        | 0,0654 [254]                | 0,0325 [254]                   | 21,9 [254]                              | 5,4 [254]<br>5,3 [290]<br>5,2 [138]         |
| CdS           | 1,78 (   $c$ ) [138]<br>1,72 ( $\perp c$ )                     | 1,15 (   $c$ ) [138]<br>1,00 [148]                          | 250—300 [114]                    | 0,038 [138]                 | 0,0324 [138]<br>0,0301 [254]   | 9,3 [138]<br>8,5 [289]                  | —                                           |
| CdSe          | 0,6 (   $c$ ) [138]<br>0,51 ( $\perp c$ )                      | $\varepsilon_p - \varepsilon_n = 1,8$<br>(   $c$ ) [289]    | 230<br>(80 К) [114]              | 0,027 [138]                 | 0,0263 [138]<br>0,0172 [254]   | 9,4 [138]<br>9,63 [138]                 | 5,98 [138]<br>6,10 [142]                    |
| CdTe          | —1,1 [202]                                                     | —2 (   $c$ ) [138]                                          | 200<br>(80 К) [114]<br>160 [236] | 0,0212 [138]                | 0,0173 [138]                   | 10,6 [138]<br>10,29 [289]<br>11,0 [161] | 7,6 [114]<br>7,21 [138]<br>7,19 [289]       |
| $\alpha$ -HgS | —                                                              | —                                                           | —                                | —                           | —                              | —                                       | —                                           |
| $\beta$ -HgS  | —                                                              | —                                                           | —                                | —                           | 0,022 [289]                    | 18,2 [290]                              | 11,3 [289]                                  |
| HgSe          | —14 [289]<br>—36 [157]<br>—22 [289]<br>—25 [157]               | —                                                           | 242 [114]                        | —                           | 0,015 [289]                    | 25,6 [114]                              | 7,2 [289]<br>11<br>14 [138]                 |
| HgTe          | —                                                              | 6 (   [100]) [289]<br>4 (   [110])<br>3 (   [111])<br>—41*6 | 143 [288]                        | 0,0171 [252]                | 0,0146 [252]                   | 21 [252]                                | —                                           |

| Соединение    | $\frac{\partial E_g}{\partial P}$<br>10 <sup>-11</sup> эВ/Па<br>(10 <sup>-9</sup> эВ/ат) | $m_n/m_0$                                           | $m_p/m_0$                                                                                                                           | $\mu_n^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с)                                                                           | $\mu_p^*$<br>см <sup>2</sup> /(В · с)       |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| ZnO           | 0,6—1,9 [10]                                                                             | 0,27 [123]                                          | 0,59 ( $v_1, v_2$ ) [280]<br>0,31—0,55 ( $v_3$ )                                                                                    | 180 [123]<br>1000 [288]                                                                                         | —                                           |
| ZnS           | 5,6* <sup>3</sup> [114]<br>9 ( $w$ )                                                     | 0,34—0,39 [289]<br>0,27 ( $w$ )* <sup>3</sup> [138] | $m_d/m_0 = 0,6$ [15]<br>1,4 ( $\parallel c, w$ )* <sup>3</sup> [289]<br>0,49 ( $\perp c, w$ )<br>0,6 [138]                          | 140 [138]<br>200 [16]                                                                                           | 5 (700 K) [138]                             |
| ZnSe          | 6 [114]                                                                                  | 0,15—0,17 [114]<br>0,18 [142]                       | 0,75 [289]                                                                                                                          | 260 (300—550 K)<br>530 [114, 138]<br>6000 (55 K) [153]                                                          | 15 (200—400 K)<br>[114]<br>23 [154]         |
| ZnTe          | 6 (114)                                                                                  | 0,12 [289]                                          | 0,65 [181]<br>0,15* <sup>7</sup> [229]                                                                                              | 350 ( $\infty T^{-3/2}$ ) [114]<br>340 [138]<br>120 [86]                                                        | 100 ( $\infty T^{-3/2}$ ) [16]<br>110 [138] |
| CdO           | —                                                                                        | 0,1 [143]<br>0,3                                    | —                                                                                                                                   | 500 [288]<br>350 [138]                                                                                          | —                                           |
| CdS           | 3,3 [123]                                                                                | 0,18—0,20<br>0,18 ( $s$ )* <sup>3</sup> [289]       | 5,0 ( $\parallel c$ ) [138]<br>0,7 ( $\perp c$ )<br>$m_d/m_0 = 1,34$ [21]                                                           | 64000 · $T^{-3/2}$ [138]<br>(50—200 K)* <sup>3</sup><br>20 ( $\infty T^{-3/2}$ ) ( $s$ )* <sup>3</sup><br>[114] | 15 [138]<br>50 [46]                         |
| CdSe          | 4 [290]                                                                                  | 0,11—0,13 [289]<br>0,10—0,12 ( $s$ )* <sup>3</sup>  | >7 ( $\parallel c, v_1$ ) [138]<br>0,45 ( $\perp c, v_1$ ) [138]<br>0,9 ( $\perp c, v_2$ ) [22]<br>$m_d/m_0 = 0,63$ ( $v_1$ ) [138] | 580 [114]<br>650 [138]                                                                                          | 50 [114]                                    |
| CdTe          | 3,0 [218]<br>7,9 [290]                                                                   | 0,10—0,12 [289]                                     | 0,1* <sup>7</sup> [289]<br>0,4* <sup>8</sup>                                                                                        | 1200 [121]<br>3000 (77 K) [121]<br>57 000 (30 K) [149]<br>45 ( $\parallel c$ ) [289]<br>13 ( $\perp c$ )        | 80 ( $\infty T^{-3/2}$ ) [114]<br>50 [121]  |
| $\alpha$ -HgS | —                                                                                        | —                                                   | —                                                                                                                                   | 10 000 (77 K) [289]<br>100 000 (4,2 K)<br>20 000 [289]                                                          | —                                           |
| $\beta$ -HgS  | —                                                                                        | 0,028 [289]                                         | —                                                                                                                                   | 33 000                                                                                                          | —                                           |
| HgSe          | 5 [289]                                                                                  | 0,050 [156]                                         | 0,17 [84]<br>0,55 [112]                                                                                                             | 100 000 (77 K) [289]<br>900 000 (4,2 K)                                                                         | —                                           |
| HgTe          | 10 [84]                                                                                  | 0,017<br>0,03 (4,2 K) [84]                          | 0,16<br>0,35 (4,2 K) [84]                                                                                                           | —                                                                                                               | —                                           |

| Соединение    | $\epsilon_{011}$ [138]  | $\epsilon_{033}$ [138]       | $\epsilon_{\infty 11}$ [138] | $\epsilon_{\infty 33}$ [138] |
|---------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| ZnO           | 7,8 ( $\perp c$ ) [290] | 8,75 ( $\parallel c$ ) [290] | 3,7 ( $\perp c$ ) [290]      | 3,75 ( $\parallel c$ ) [290] |
| ZnS           | —                       | —                            | 5,13                         | —                            |
| ZnSe          | —                       | —                            | 5,9                          | —                            |
| ZnTe          | —                       | —                            | 7,28                         | —                            |
| CdO           | —                       | —                            | —                            | —                            |
| CdS           | 9,02                    | 9,53                         | 5,17                         | 5,23                         |
| CdSe          | 10,2                    | 9,33                         | 5,96                         | 6,05                         |
| CdTe          | —                       | —                            | 7,21                         | —                            |
| $\alpha$ -HgS | 18,2 [290]              | 23,5 [290]                   | 6,25 [290]                   | 7,9 [290]                    |
| $\beta$ -HgS  | —                       | —                            | —                            | —                            |
| HgSe          | —                       | —                            | —                            | —                            |
| HgTe          | —                       | —                            | —                            | —                            |

\*<sup>1</sup> Может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита.\*<sup>2</sup> Может кристаллизоваться в структуре типа вюрцита.\*<sup>3</sup> Знаками  $s, w$  помечены данные, относящиеся к модификациям типа сфалерита и вюрцита. Непомеченные данные относятся к основной модификации.\*<sup>4</sup> Тяжелые дырки.\*<sup>5</sup> Значение, усредненное по кристаллографическим направлениям.\*<sup>6</sup> Легкие дырки.\*<sup>7</sup> Масса легких дырок.\*<sup>8</sup> Масса тяжелых дырок.

Таблица 22.13. Полупроводниковые соединения  $A^{II}B^{VI}$  [293]

| Соединение                | Кристаллическая структура |                                        | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $E_g$ , эВ | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ ,<br>10 <sup>-4</sup> эВ/К | $m_n/m_0$                                 |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------------------|----------------------------|--------------|------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                           | Система,<br>группа        | $a, b, c$ , нм                         |                            |              |            |                                                              |                                           |
| $\beta$ -HgI <sub>2</sub> | Орторомб., $C_{2v}^{12}$  | 0,467 (a); 1,376 (b);<br>0,732 (c) [1] | 6,09                       | 532          | 2,39       | —(7—14)                                                      | 0,25 ( $m_{  }$ )<br>0,29 ( $m_{\perp}$ ) |
| CdF <sub>2</sub>          | Куб., $O_h^5$             | 0,539 [1]                              | —                          | —            | 6,05 [26]  | —                                                            | 0,4 [26]                                  |
| CdI <sub>2</sub>          | Гекс.                     | 0,424 (a); 0,683 (c)                   | 5,67                       | 660          | 3,47       | —12                                                          | —                                         |

| Соединение                | $m_p/m_0$                                 | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В · с) | $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /(В · с) | $\epsilon_0$              | $\epsilon_{\infty}$      |
|---------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| $\beta$ -HgI <sub>2</sub> | 1,72 ( $m_{  }$ )<br>0,56 ( $m_{\perp}$ ) | 100                                | —                                  | 8,5—25,9<br>(анизотропна) | 5,1—6,8<br>(анизотропна) |
| CdF <sub>2</sub>          | —                                         | 19 [26]                            | —                                  | —                         | —                        |
| CdI <sub>2</sub>          | —                                         | —                                  | —                                  | 5,9—12,9<br>(анизотропна) | 4,3—4,6<br>(анизотропна) |

центре зоны Бриллюэна (при  $k=0$ ). Вблизи него поверхность постоянной энергии близка к эллипсоиду вращения с большой осью, направленной вдоль оси  $a$ . Экстремум валентной зоны расположен в точке  $k \neq 0$ . Обзор свойств соединений типа  $A^{II}B^{VI}$  см. в [241].

Все соединения типа  $A^{II}B^{VI}$  являются фазами переменного состава. Полиморфизм и политипизм, свойственные многим из них, приводят к сильной зависимости структурно чувствительных свойств от условий выращивания кристалла и термической обработки.

Наиболее изученные полупроводники кристаллизуются в решетках типа сфалерита  $T_d^2$  или вюрцита  $C_v^4$  и имеют прямую зонную структуру (экстремумы зоны проводимости и валентной расположены в точке  $k=0$ ). Кристаллы кубической структуры (сфалерит) изотропны; одна из подзон их валентной зоны отщеплена за счет спин-орбитального взаимодействия  $\Delta_{so}$  (см. рис. 22.97). Кристаллы гексагональной структуры (вюрцит) слабо анизотропны (этой анизотропией часто пренебрегают); наличие дополнительного взаимодействия  $\Delta_{cr}$  (кристаллическое поле некубического кристалла) приводит к расщеплению валентной зоны на три подзоны (см. рис. 22.98). Экспериментально определяемые оптическими методами расщепления  $E_1$  и  $E_2$  связаны с  $\Delta_{so}$  и  $\Delta_{cr}$  соотношениями [138]

$$E_{1/2} = \frac{1}{2} (\Delta_{so} + \Delta_{cr}) \mp \left[ \frac{1}{4} (\Delta_{so} + \Delta_{cr})^2 - \frac{2}{3} \Delta_{so} \Delta_{cr} \right]^{1/2}.$$

HgS, HgSe и HgTe имеют сложную зонную структуру с перекрывающимися зонами (см. рис. 22.99). Перекрывание порядка  $E_t \sim 0,001$  эВ [199, 200] (по другим данным  $E_t = 0,02$  эВ (HgTe); 0,07 эВ (HgSe) [138]).

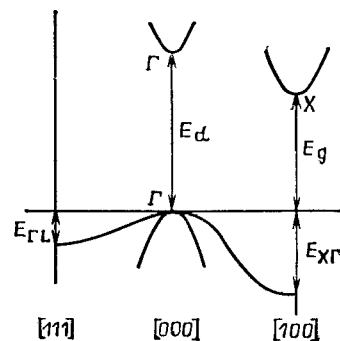


Рис. 22.66. Зонная структура  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Ge$ ,  $Mg_2Sn$  [123, 129, 130, 293]

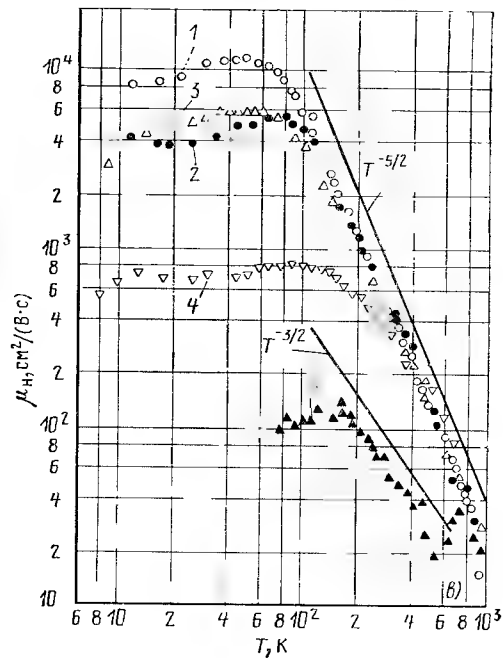
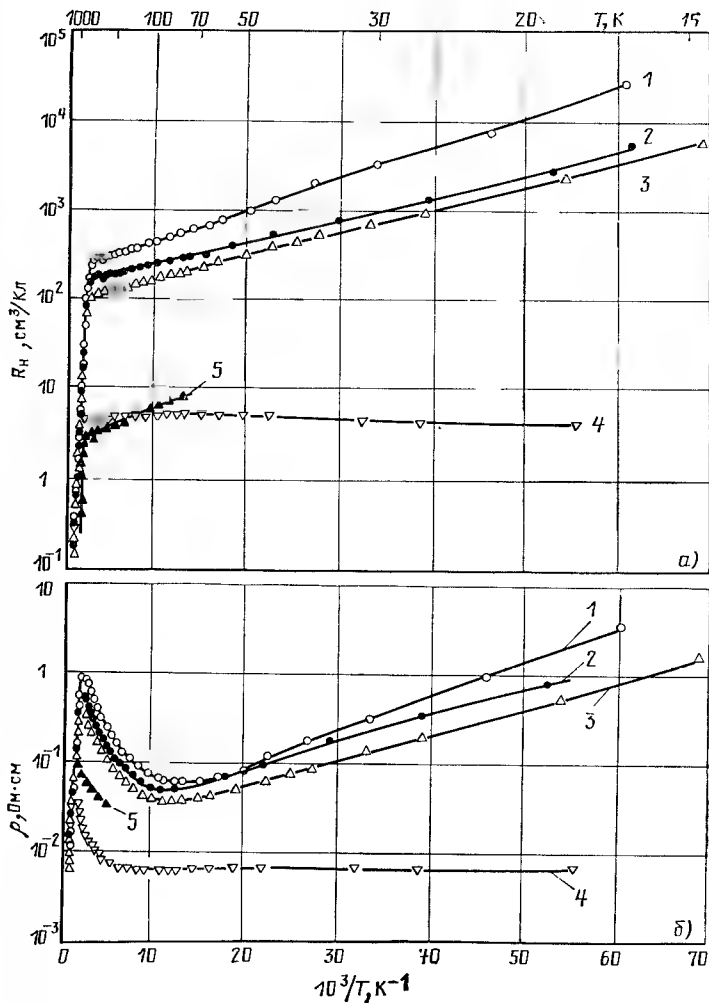


Рис. 22.67. Температурные зависимости коэффициента Холла (а), удельного сопротивления (б) и холловской подвижности электронов и дырок (в) в образцах  $\text{Mg}_2\text{Si}$   $n$ -типа (1–4) и  $p$ -типа (5) [134]. Концентрация носителей  $n=2,8 \cdot 10^{16} \div 1,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (увеличивается от 1 к 4) и  $p=2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответственно

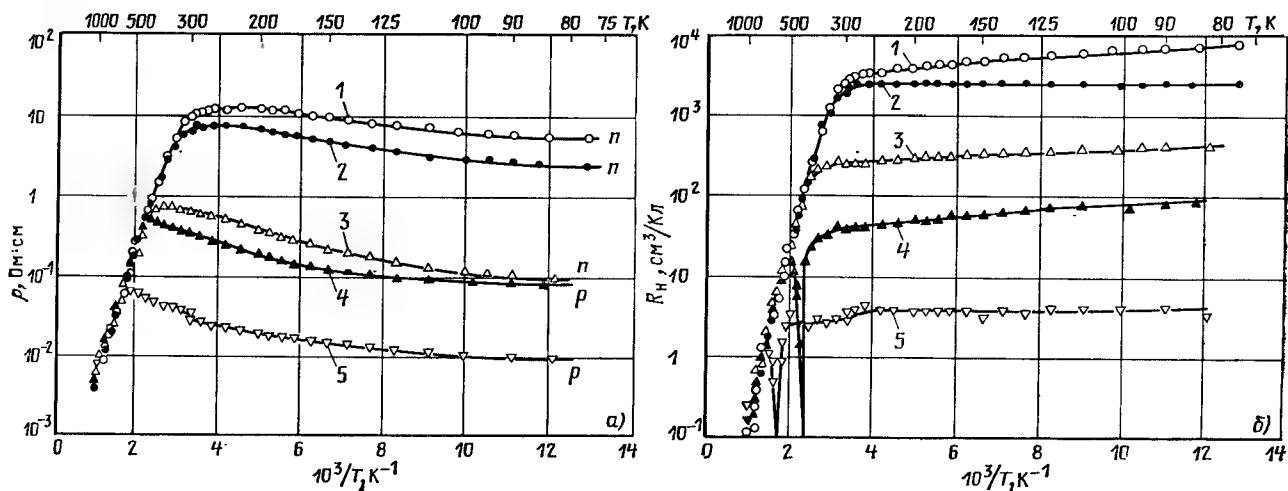


Рис. 22.68. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) в  $n$ - и  $p$ - $\text{Mg}_2\text{Ge}$  [135]:  
1–5 — образцы с различной концентрацией носителей, возрастающей от 1 к 5



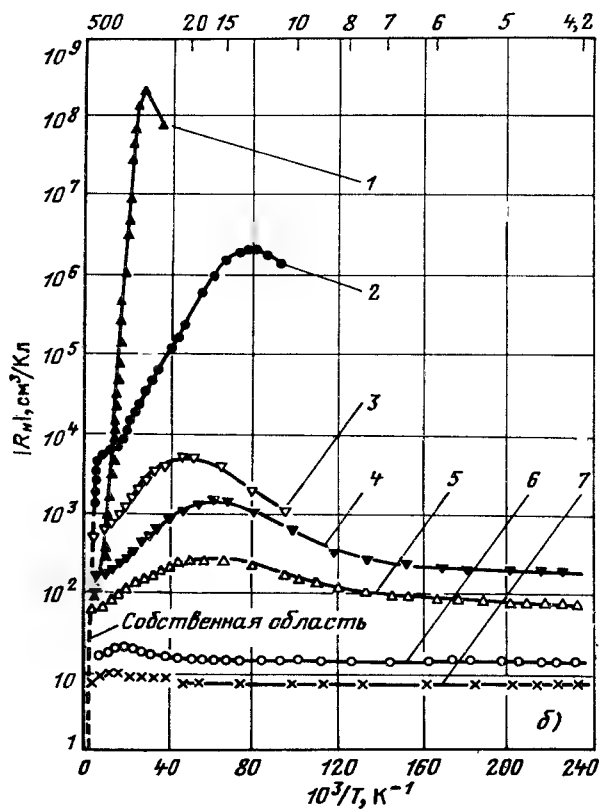
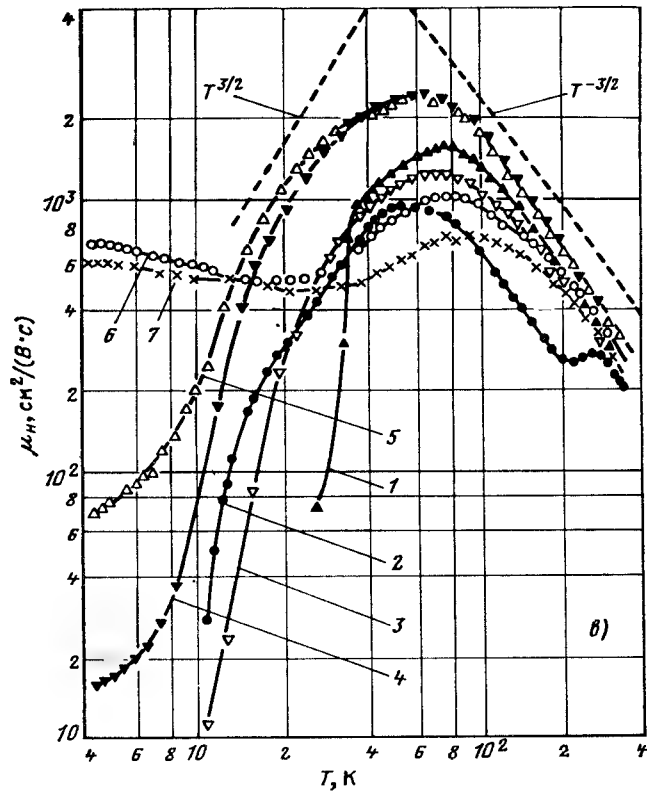
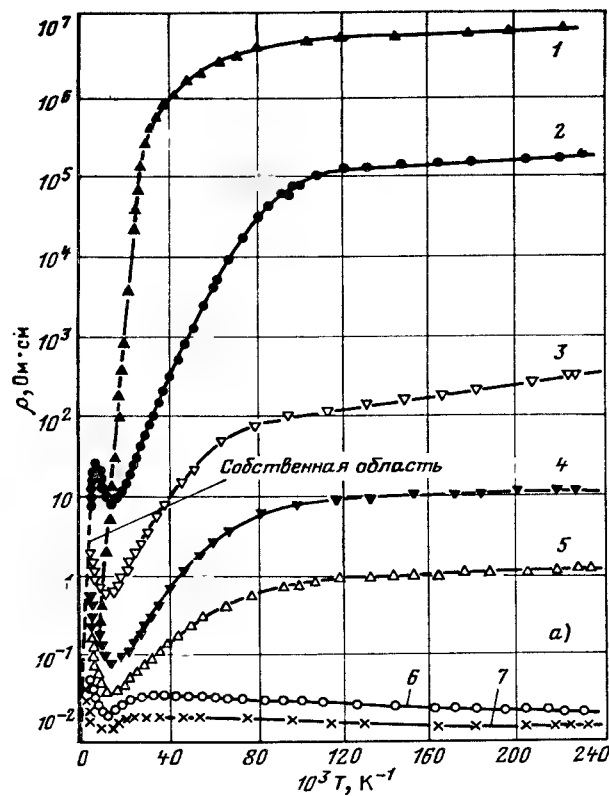


Рис. 22.69. Температурные зависимости удельного сопротивления (а), коэффициента Холла (б) и холловской подвижности электронов (в) в различных образцах  $n\text{-Mg}_2\text{Ge}$  с концентрацией носителей, меняющейся от  $1,3 \cdot 10^{16}$  до  $8,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (1—7)

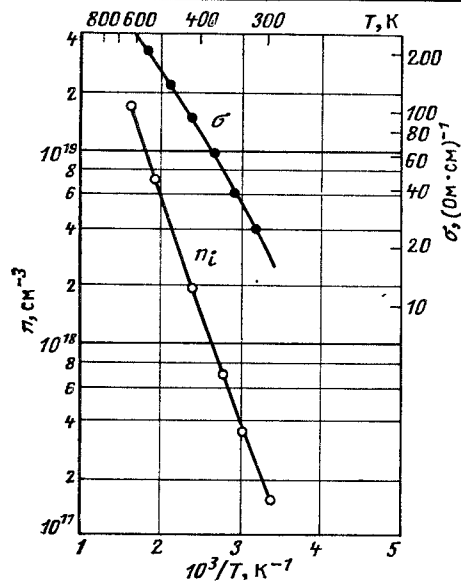


Рис. 22.70. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в  $\text{Mg}_2\text{Sn}$ , определенная из данных по отражению на свободных носителях (○) и электропроводности (●) [147]

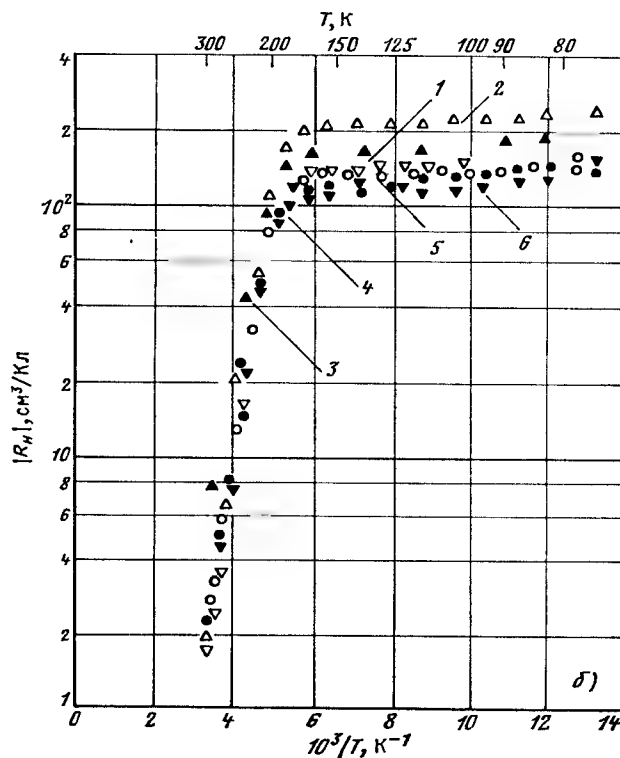
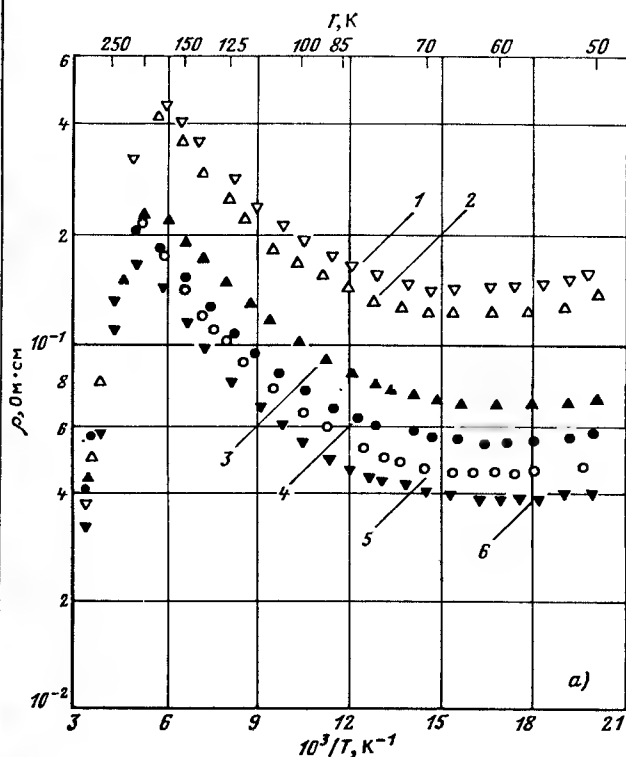


Рис. 22.71. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) для различных образцов  $n\text{-Mg}_2\text{Sn}$  с концентрацией носителей, меняющейся от  $3 \cdot 10^{16}$  до  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (1—6) в области смешанной проводимости [137]

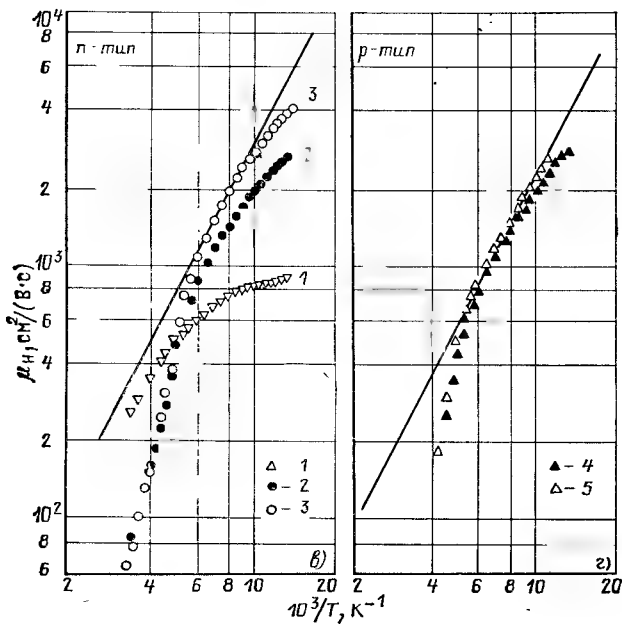
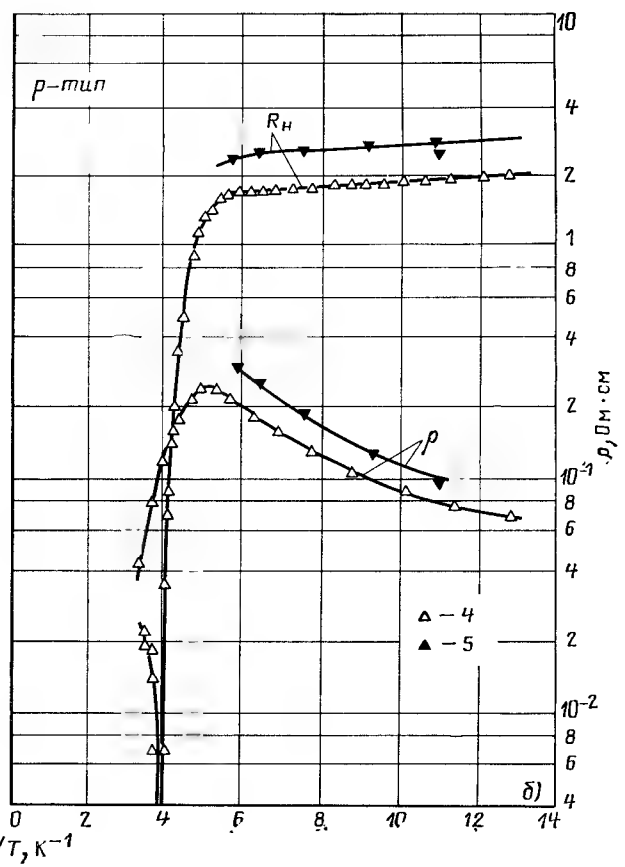
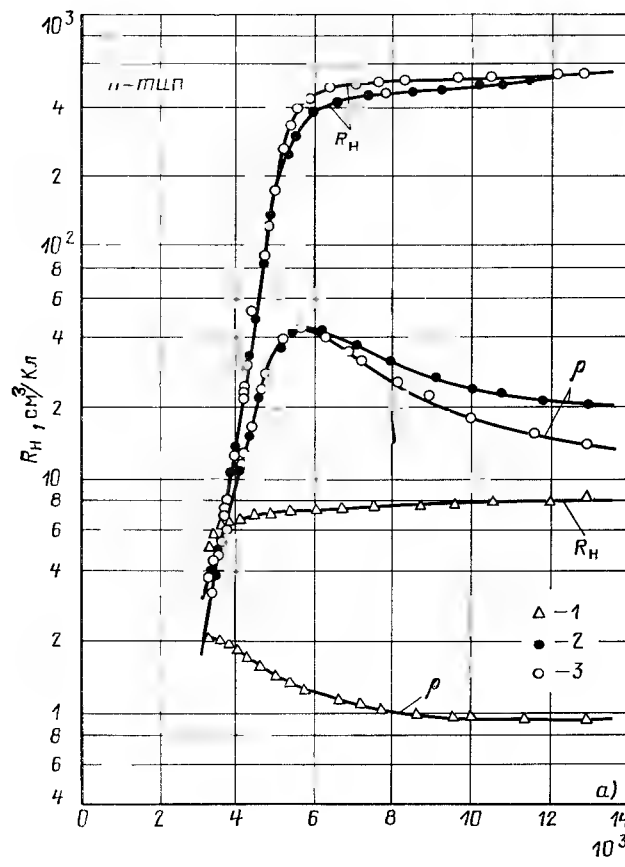


Рис. 22.72. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла  $n$ - $Mg_2Sn$  (а),  $p$ - $Mg_2Sn$  (б), а также холловской подвижности электронов (в) и дырок (г) в различных образцах  $n$ - и  $p$ -типа [146]: концентрация носителей,  $cm^{-3}$ : 1— $9 \cdot 10^{17}$  ( $n$ ); 2— $1,5 \cdot 10^{16}$  ( $n$ ); 3— $1,3 \cdot 10^{16}$  ( $n$ ); 4— $4,3 \cdot 10^{16}$  ( $p$ ); 5— $3 \cdot 10^{16}$  ( $p$ )

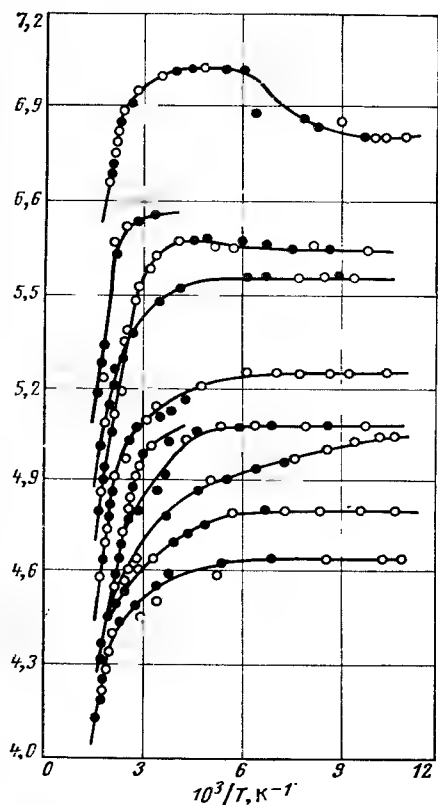


Рис. 22.73. Температурная зависимость удельного сопротивления  $\text{Mg}_2\text{Pb}$  для образцов  $p$ -типа [158]  
 $\ln(10^6 \rho)$ , Ом·см

● — измерения при возрастании температуры образца;  
○ — измерения при уменьшении температуры образца

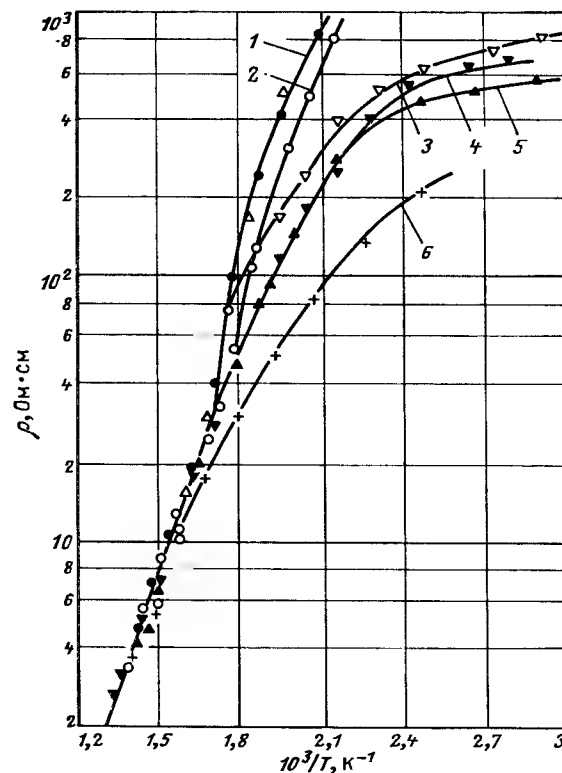


Рис. 22.75. Температурная зависимость сопротивления  $\text{Zn}_3\text{P}_2$  в собственной области [163]:  
концентрация носителей возрастает от 1 к 6

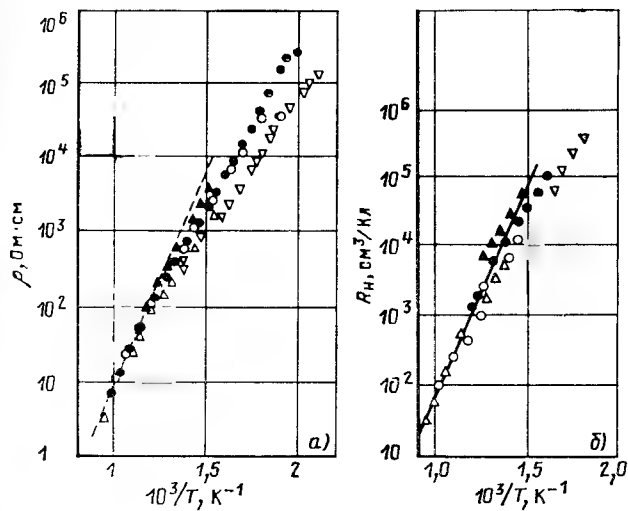


Рис. 22.74. Температурная зависимость сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) различных поликристаллических образцов  $\text{Mg}_3\text{As}_2$  [160]

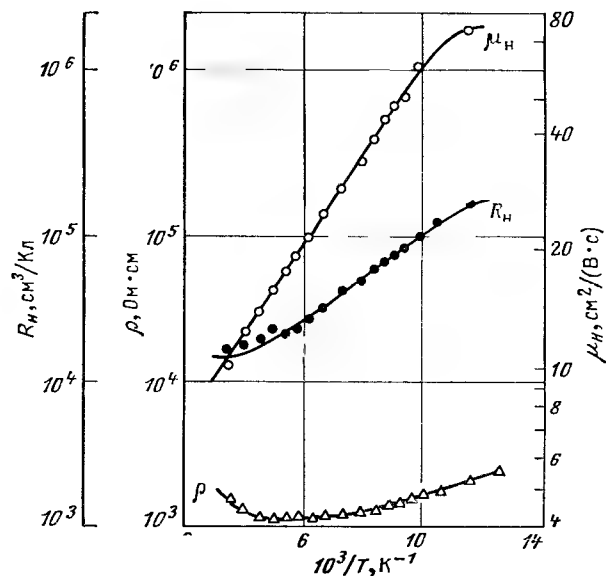


Рис. 22.76. Температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho$ , коэффициента Холла  $R_H$  и подвижности дырок  $\mu_H$  в  $\text{Zn}_3\text{P}_2$  [165]

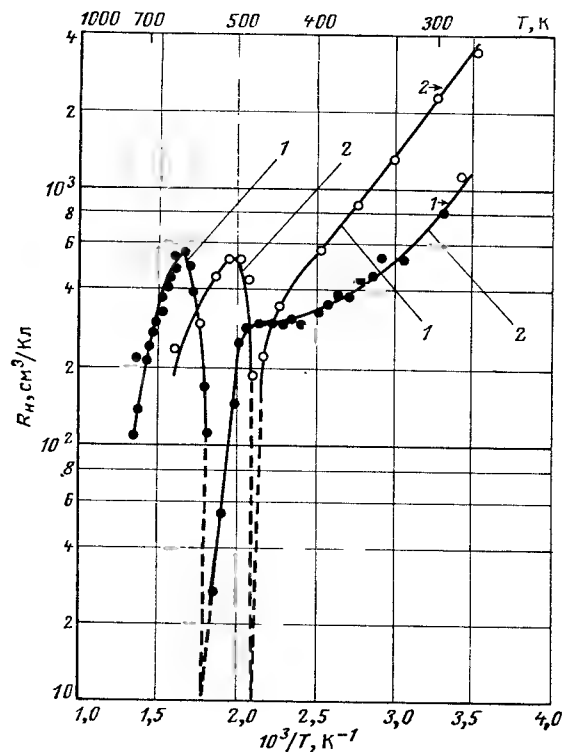


Рис. 22.77. Температурная зависимость коэффициента Холла в  $\beta$ - $\text{ZnP}_2$  [166]:  
1 — кристаллы, полученные из паровой фазы; 2 — кристаллы, полученные из жидкой фазы

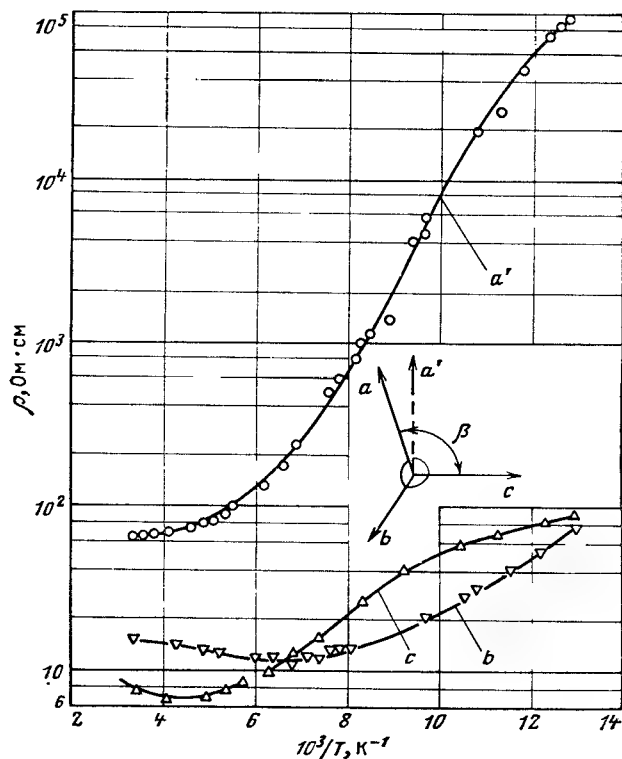


Рис. 22.78. Температурная зависимость удельного сопротивления для трех вырезанных из одного монокристалла образцов  $\text{ZnAs}_2$  [167]:  
ориентация образцов показана на вставке, направления  $b$  и  $c$  соответствуют кристаллическим осям, направление  $a'$  перпендикулярно  $b$  и  $c$  и составляет угол  $12^\circ$  с моноклинной осью  $a$

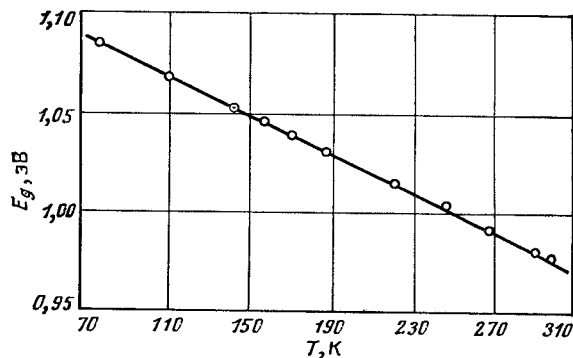


Рис. 22.79. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны в  $\text{Zn}_3\text{As}_2$  [176]

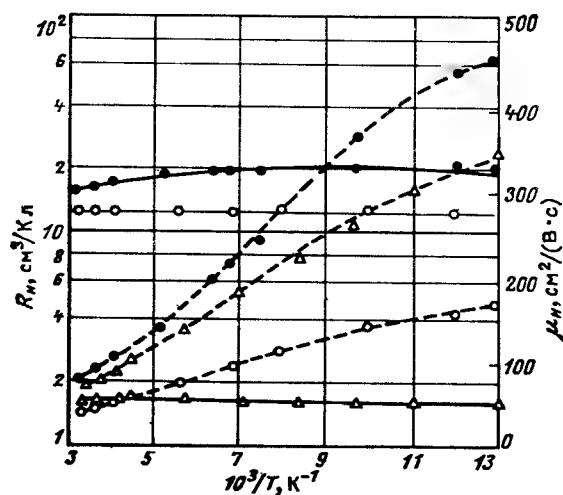


Рис. 22.80. Температурные зависимости коэффициента Холла и подвижности дырок в  $\text{Zn}_3\text{As}_2$  [177]:  
—  $R_H$ ; —  $\mu_H$ ;  $\circ$  — нелегированный образец;  
 $\Delta$  — легирован Cu;  $\bullet$  — легирован Te

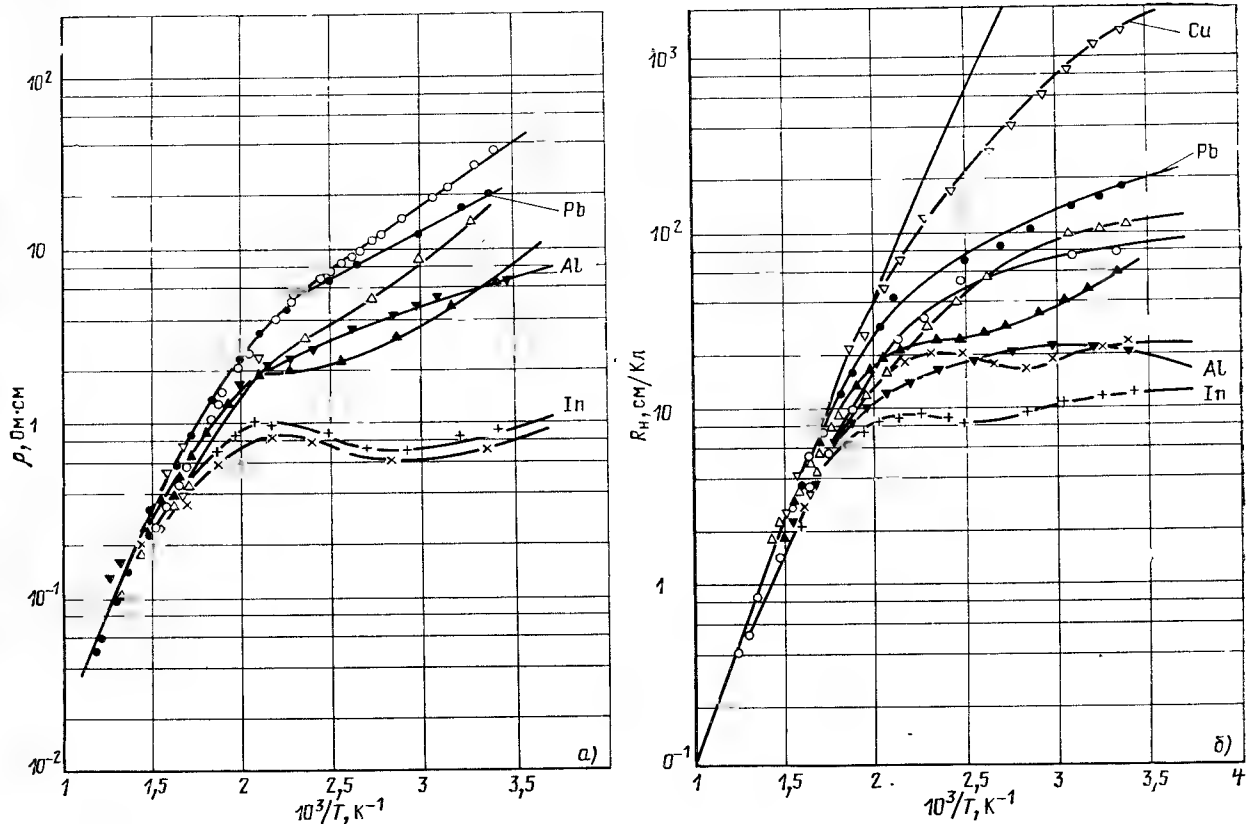


Рис. 22.81. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) в  $\text{Zn}_3\text{As}_2$  [179]: на ряде кривых указаны легирующие элементы, остальные кривые относятся к чистому материалу; кривая без экспериментальных точек — коэффициент Холла в собственном материале [179]

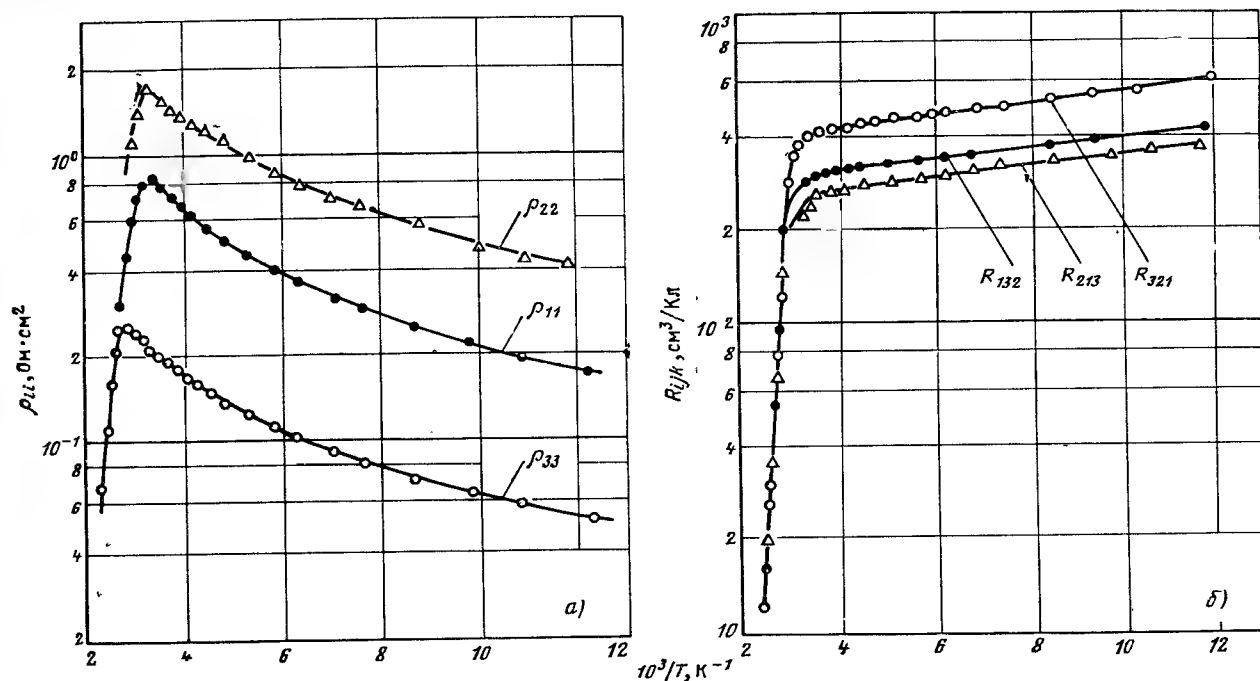


Рис. 22.82. Температурные зависимости компонент тензора удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) в  $\text{ZnSb}$  [180]

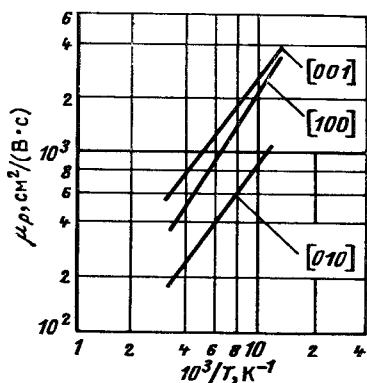


Рис. 22.83. Температурная зависимость холловской подвижности дырок для трех главных направлений в ZnSb [182]

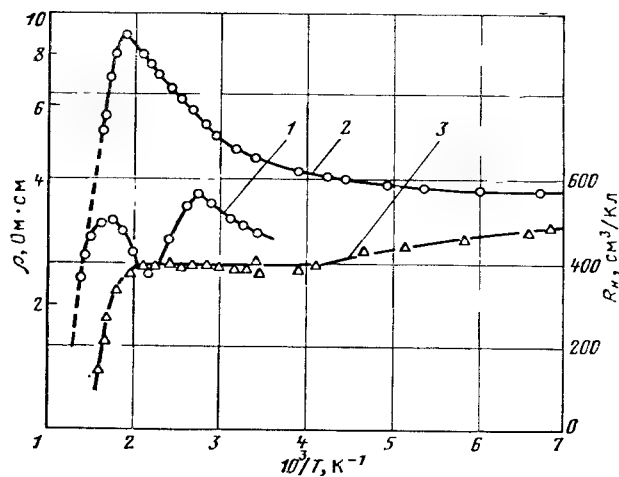


Рис. 22.85. Температурные зависимости удельного сопротивления (1, 2) и коэффициента Холла (3) в CdP<sub>4</sub> [189]: 1 — монокристалл; 2, 3 — поликристаллы

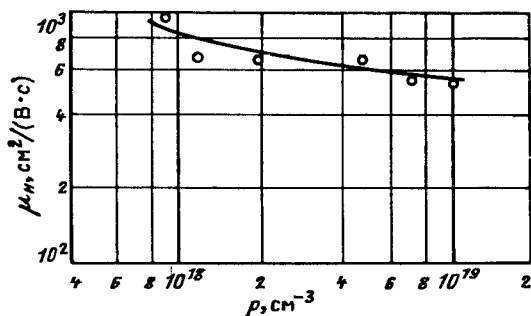


Рис. 22.84. Зависимость холловской подвижности дырок от их концентрации при  $T=300$  К в Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub> [187]

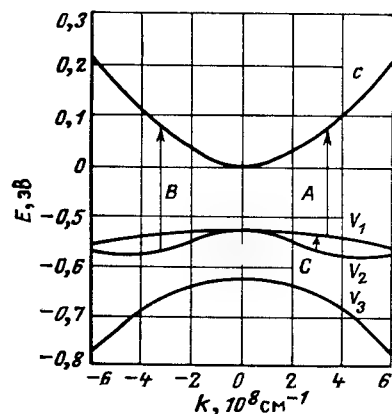


Рис. 22.86. Структура энергетических зон в Cd<sub>3</sub>P<sub>2</sub> [192] ( $E_g=0,53$  эВ,  $\Delta_{so}=0,1$  эВ,  $P=6,7 \cdot 10^{-8}$  эВ·см,  $m_{v1}=0,5 m_0$ ) [192]:

A, B, C — разрешенные прямые межзонные переходы; V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> — валентные зоны; c — зона проводимости

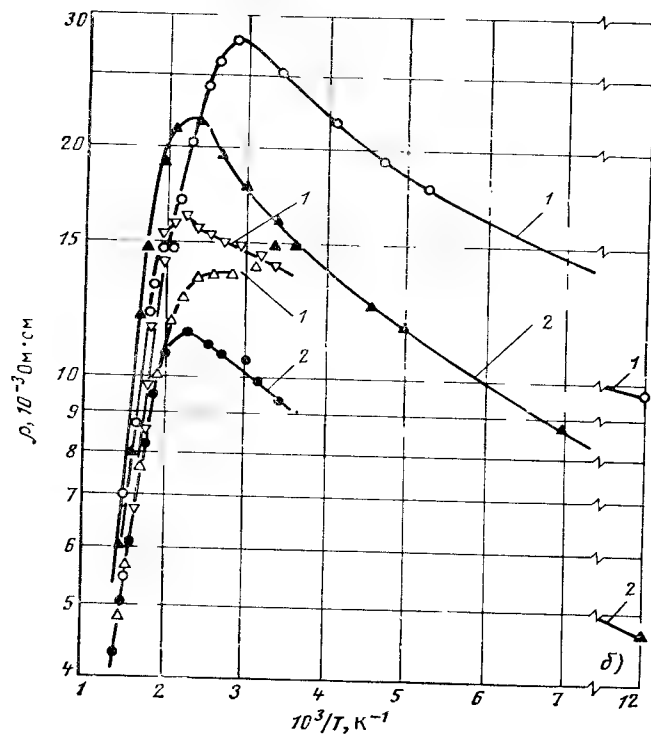
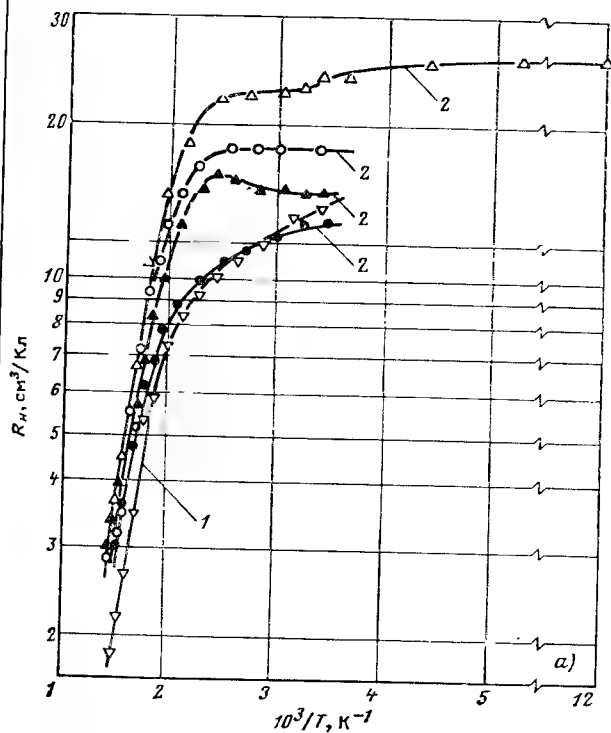


Рис. 22.87. Температурные зависимости коэффициента Холла (а) и удельного сопротивления (б) в монокристаллических (1) и поликристаллических (2) образцах  $\text{Cd}_3\text{P}_2$  [190]

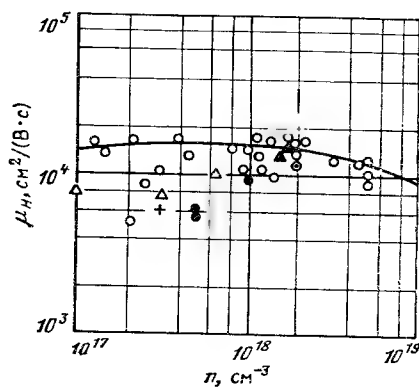


Рис. 22.88. Зависимость подвижности электронов при  $T=77$  К от их концентрации в  $\text{Cd}_3\text{P}_2$  [191]: сплошная линия — расчет; точки — разные экспериментальные работы



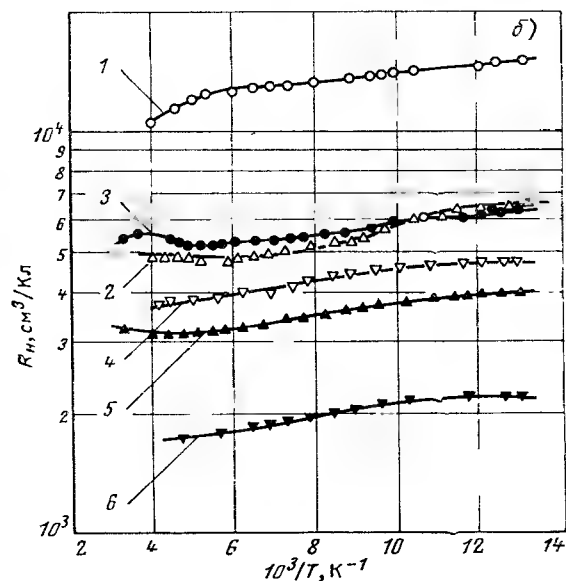
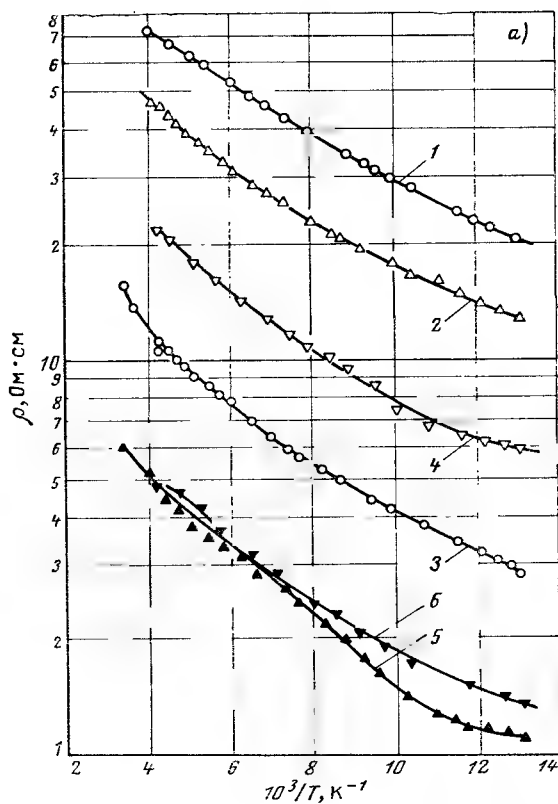


Рис. 22.89. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) для монокристаллических образцов  $n\text{-CdAs}_2$  [195]: концентрация носителей возрастает от 1 к 6

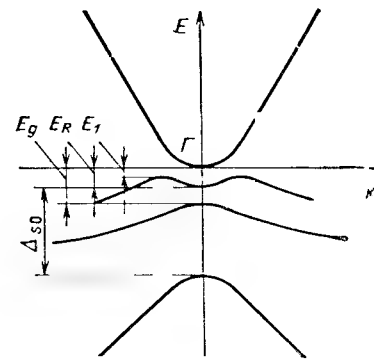


Рис. 22.90. Структура энергетических зон в  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  [293]:  $E_g = 0,12 + 3,3 \cdot 10^{-4} T$  эВ;  $E_R = 0,03$  эВ (10 К);  $E_I = 0,05$  эВ (4,2 К);  $E_1 = 0,026$  эВ (10 К);  $\Delta s_0 = 0,21 \div 0,31$  эВ

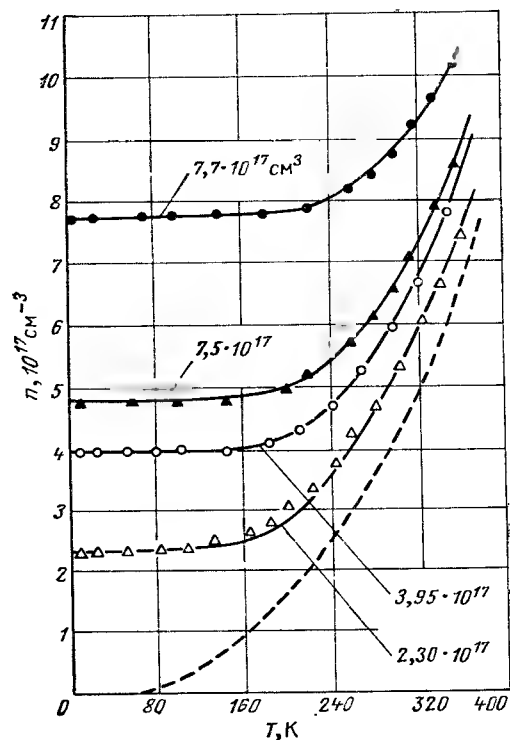


Рис. 22.91. Температурная зависимость концентрации электронов в различных кристаллах  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  [196]: пунктирная линия соответствует собственной концентрации

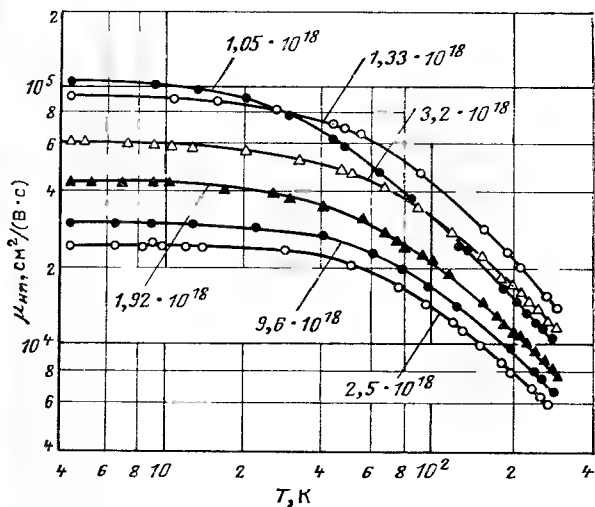


Рис. 22.92. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  [187]

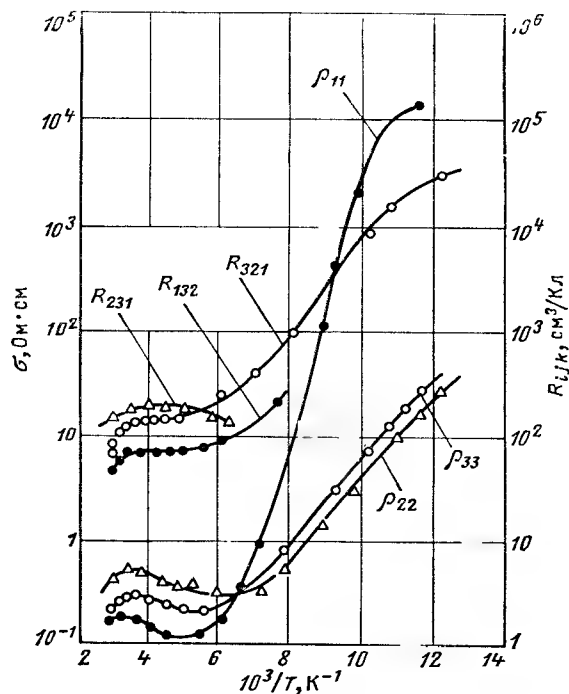


Рис. 22.94. Температурные зависимости компонент тензора удельного сопротивления и коэффициента Холла в  $n\text{-CdSb}$ , легированном Ga [205]

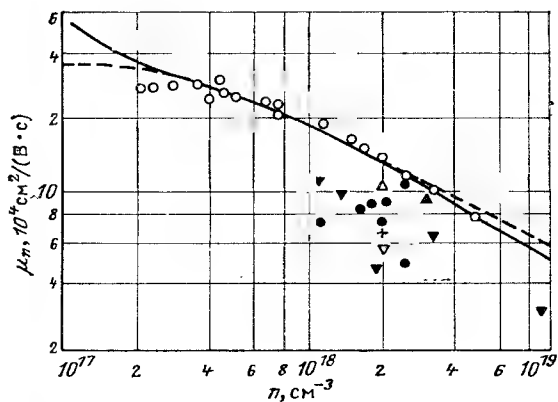


Рис. 22.93. Зависимость подвижности электронов от их концентрации в  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  при  $T=4,2$  K по данным различных авторов [204]:  
линии — расчет

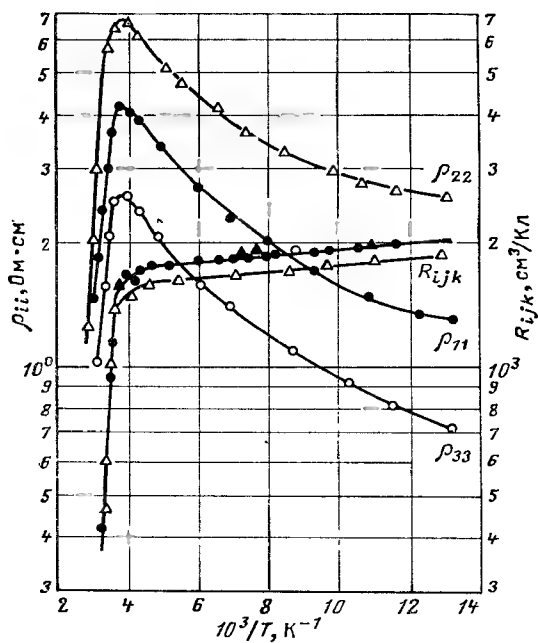


Рис. 22.95. Температурная зависимость компонент тензора удельного сопротивления и коэффициента Холла в  $p\text{-CdSb}$  [205]

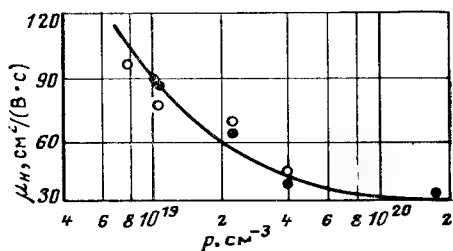


Рис. 22.96. Зависимость холловской подвижности дырок от их концентрации в  $\text{Cd}_4\text{Sb}_3$  [187]

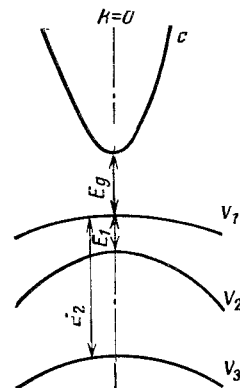


Рис. 22.98. Зонная структура полупроводников типа  $\text{A}^{11}\text{B}^{11}$  (вюрцит) [138]

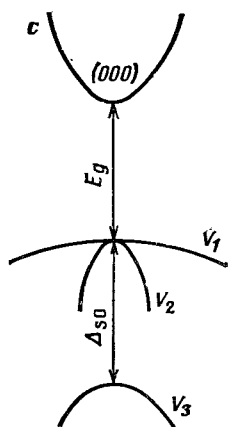


Рис. 22.97. Зонная структура полупроводников типа  $\text{A}^{11}\text{B}^{11}$  (сфалерит) [138]

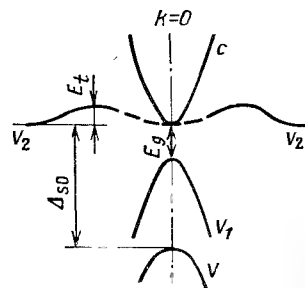


Рис. 22.99. Зонная структура  $\beta\text{-HgS}$ ,  $\text{HgSe}$  и  $\text{HgTe}$  [138, 199, 200]

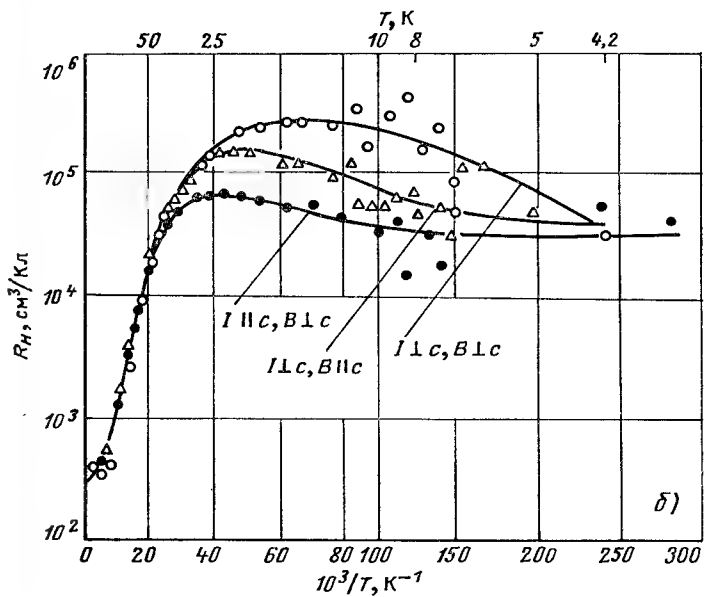
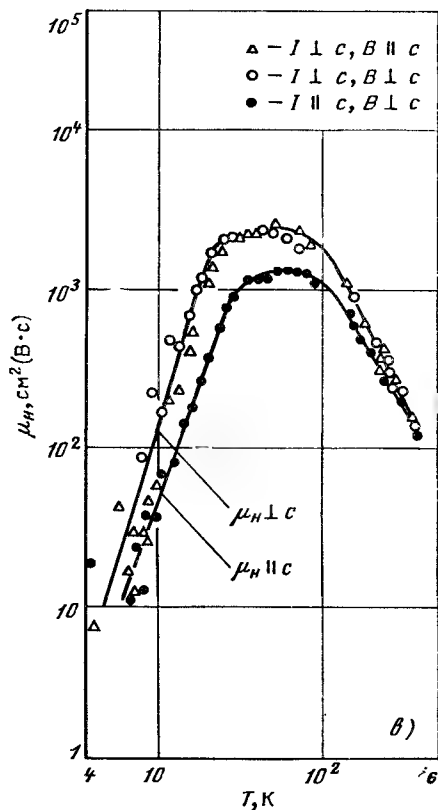
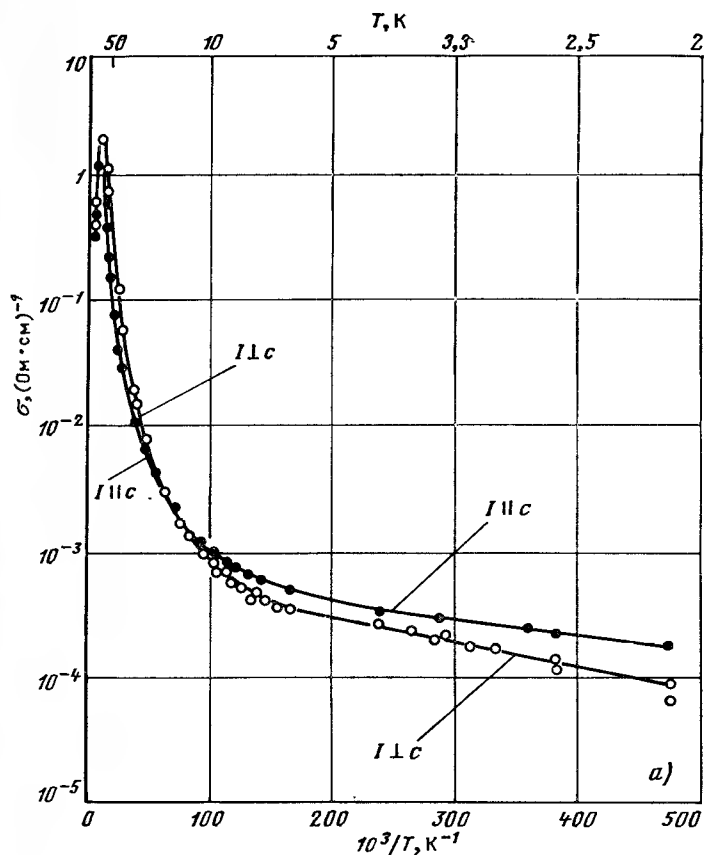


Рис. 22.100. Температурные зависимости проводимости (а), коэффициента Холла (б) и холловской подвижности электронов (в) в ZnO при различных ориентациях тока  $I$  и магнитного поля  $B$  относительно оси  $c$  [207]

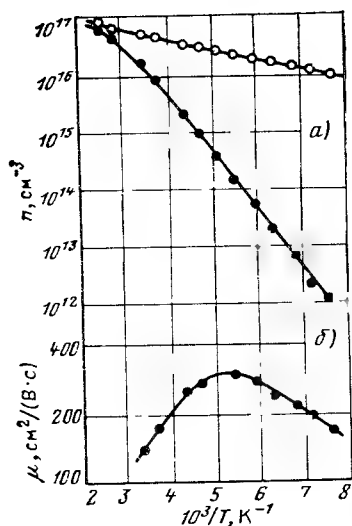


Рис. 22.101. Температурные зависимости концентрации электронов (а) и их холловской подвижности (б) в ZnS [138]:  
 ● — гексагональный ZnS, легированный Al и отожженный при 1050 К; ○ — кубический ZnS, легированный I и отожженный при 950 К

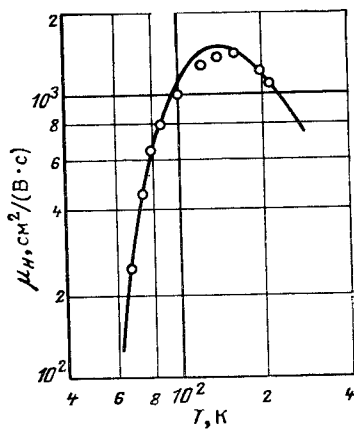


Рис. 22.103. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в ZnSe [208]

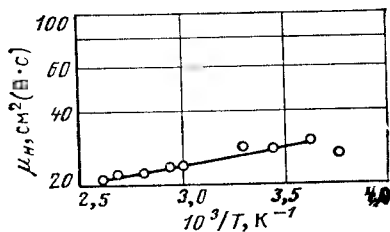


Рис. 22.104. Температурная зависимость холловской подвижности в ZnSe [210]

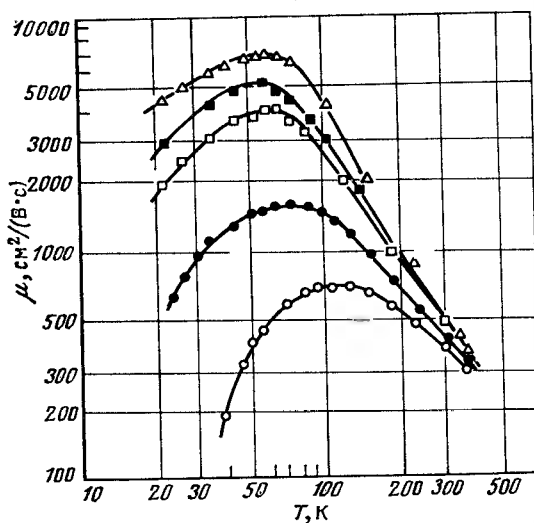
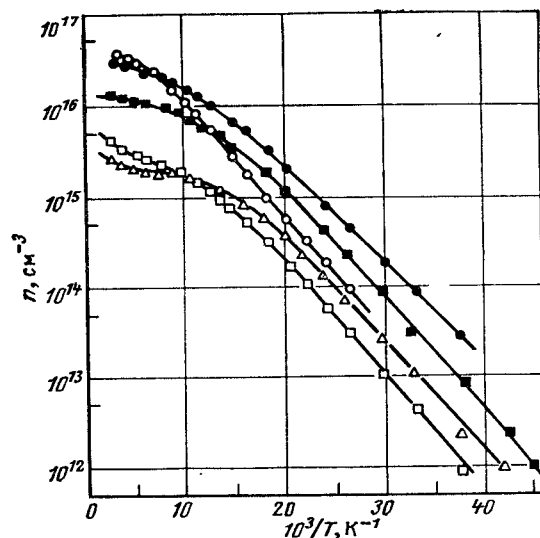


Рис. 22.102. Температурные зависимости концентрации электронов (а) и их холловской подвижности (б) в кристаллах n-ZnSe с различной концентрацией доноров и акцепторов [138]:

$N_D, N_A, 10^{16} \text{ см}^{-3}$ :  $\Delta$  — 0,34 ( $N_D$ ), 0,13 ( $N_A$ );  $\blacksquare$  — 1,8 ( $N_D$ ), 0,5 ( $N_A$ );  $\square$  — 1,05 ( $N_D$ ), 0,75 ( $N_A$ );  $\bullet$  — 3,7 ( $N_D$ ), 0,5 ( $N_A$ );  $\circ$  — 7,4 ( $N_D$ ), 3,4 ( $N_A$ )

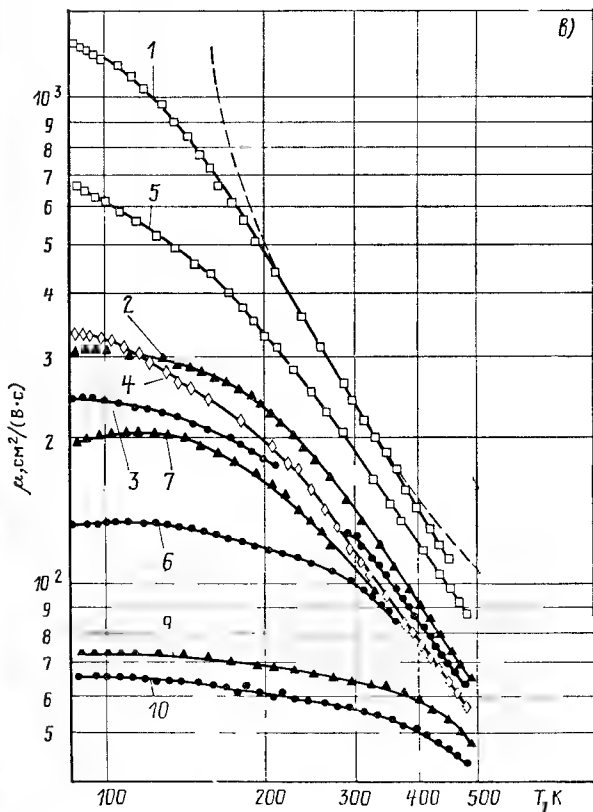
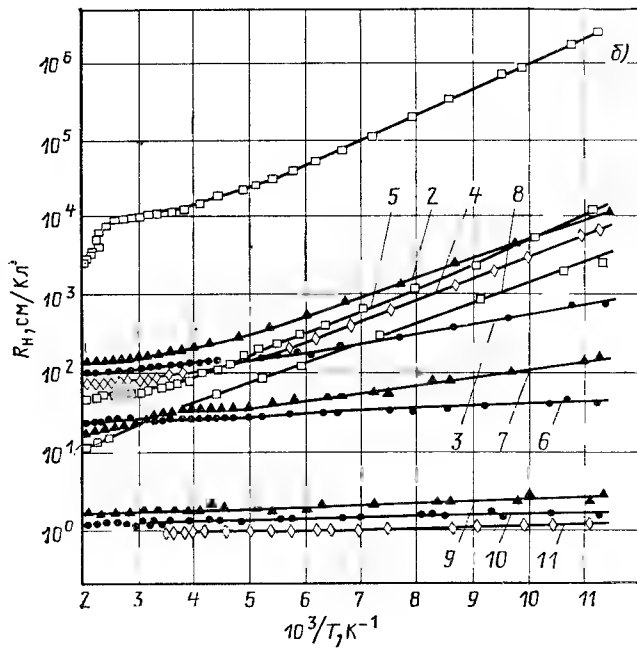
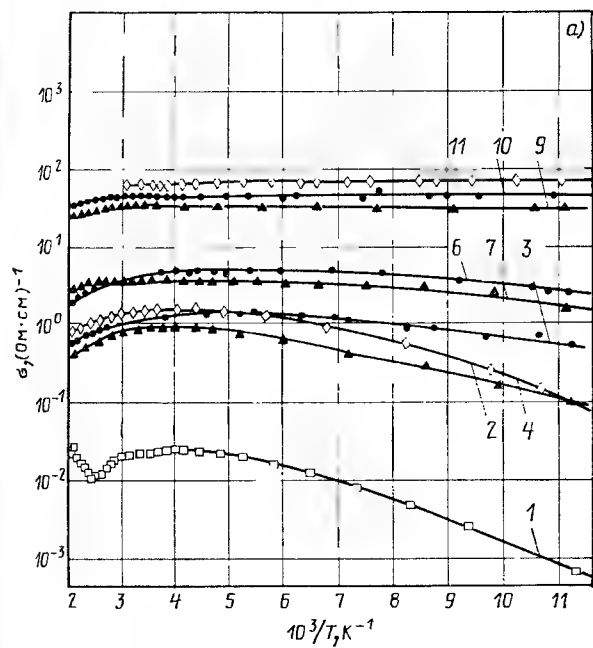


Рис. 22.105. Температурные зависимости проводимости (а), коэффициента Холла (б) и подвижности дырок (в) в кристаллах  $p$ -ZnTe [235]:

пунктир — теоретическая зависимость; легирующая примесь:  $\diamond$  — Cs;  $\square$  — Te;  $\triangle$  — P;  $\bullet$  — Li; концентрация носителей при  $T = 300$  K,  $\text{см}^{-3}$ : 1— $5 \cdot 10^4$ ; 2— $3,2 \cdot 10^6$ ; 3— $5,1 \cdot 10^{10}$ ; 4— $6,9 \cdot 10^{16}$ ; 5— $7,9 \cdot 10^{16}$ ; 6— $2,8 \cdot 10^{17}$ ; 7— $2,1 \cdot 10^{17}$ ; 8— $2 \cdot 10^{17}$ ; 9— $3 \cdot 10^{18}$ ; 10— $4,5 \cdot 10^{18}$ ; 11— $6,3 \cdot 10^{18}$ .

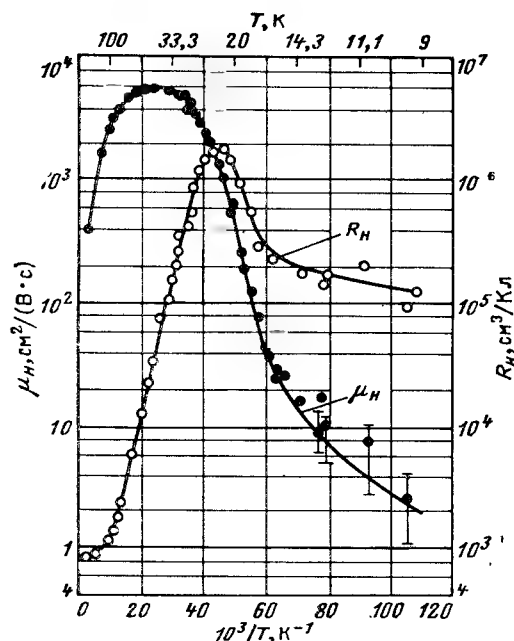


Рис. 22.106. Температурные зависимости коэффициента Холла (○) и холловской подвижности электронов (●) в нелегированном кристалле CdS [213]

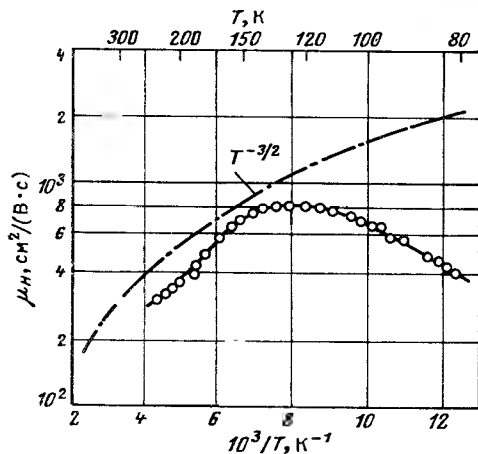


Рис. 22.107. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в различных кристаллах CdS [215]

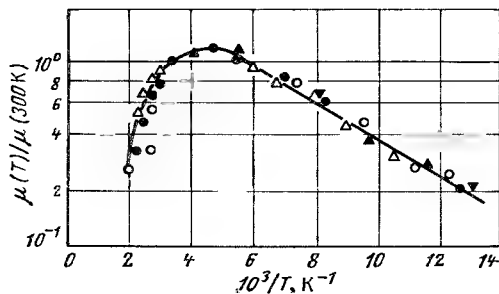


Рис. 22.108. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в разных образцах CdS [217]

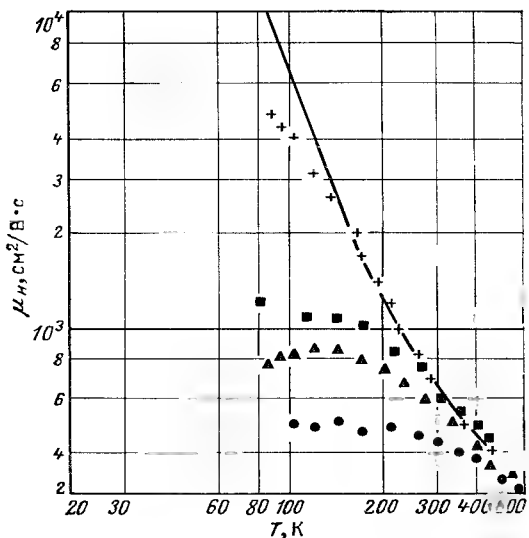


Рис. 22.109. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в CdSe [138]: концентрация доноров Ga, см⁻³: + —  $1 \cdot 10^{16}$  (нелегированный образец); ■ —  $1,4 \cdot 10^{17}$ ; ● —  $9 \cdot 10^{16}$ ; кривая — расчет

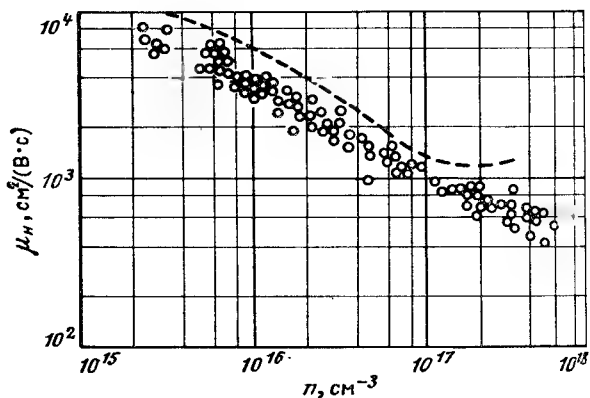


Рис. 22.110. Зависимость холловской подвижности электронов в CdSe при  $T=77$  К от их концентрации: пунктир — расчет [218]

Рис. 22.112. Температурные зависимости холловской подвижности электронов в  $n$ -CdTe [138]. Обозначения см. в подписи к рис. 22.111; сплошная и пунктирная линии — расчет по разным моделям

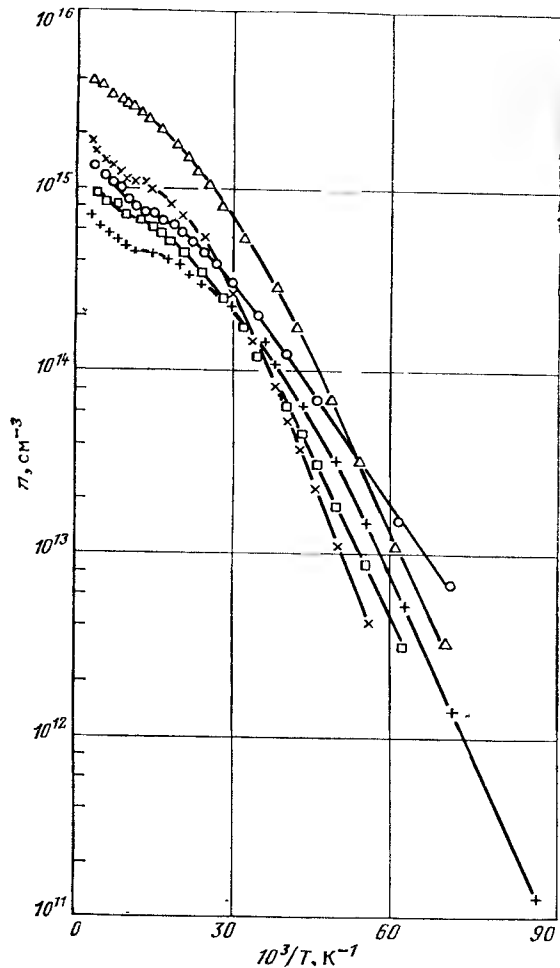


Рис. 22.111. Температурная зависимость концентрации электронов в  $n$ -CdTe [138]:

+ , O , X ,  $\square$  ,  $\triangle$  — нелегированные образцы, прошедшие зонную очистку; O — отжиг в избытке Cd

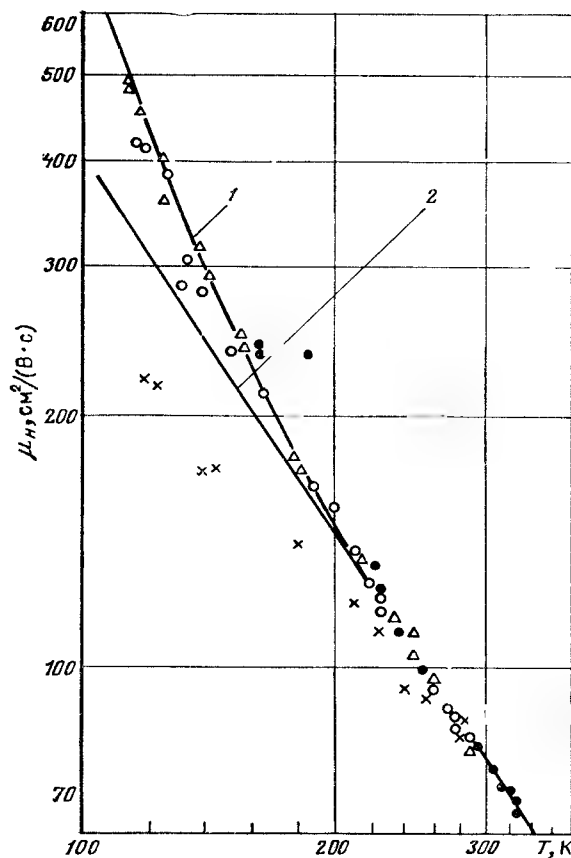
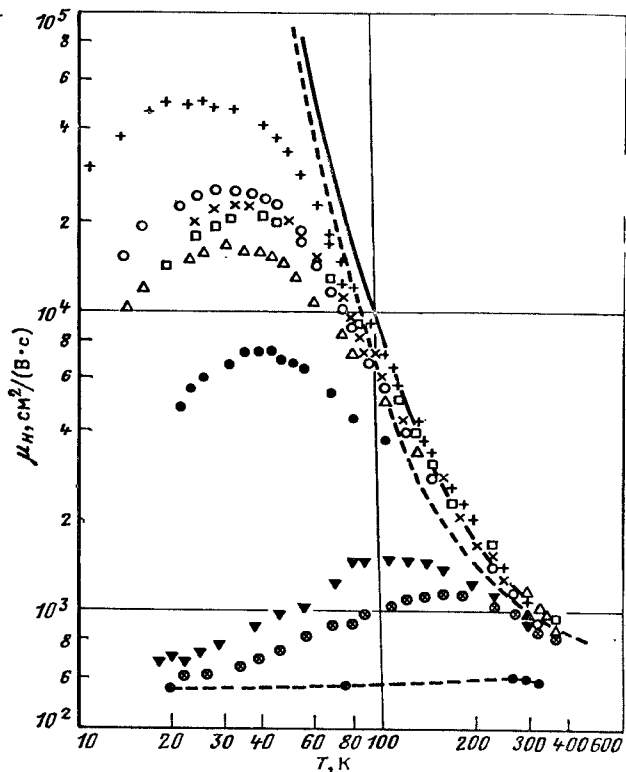


Рис. 22.113. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в  $p$ -CdTe [138]:

1, 2 — расчет по формулам:  $\mu = 57 \exp [(252/T) - 1]$  и  $\mu = 4 \cdot 10^6 \times T^{-3/2}$ ; удельное сопротивление образцов при  $T = 293$  K, Ом·см:  $\bullet$  —  $2.2 \cdot 10^2$ ; O —  $1.5 \cdot 10^4$ ; X —  $1.9 \cdot 10^2$ ;  $\triangle$  —  $2.1 \cdot 10^2$



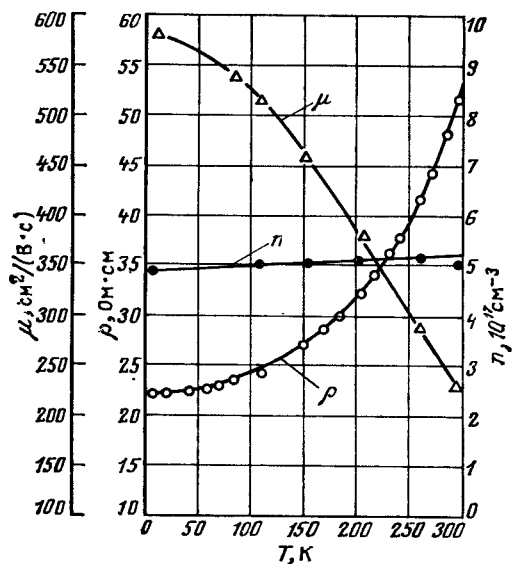


Рис. 22.114. Температурные зависимости удельного сопротивления, подвижности электронов и их концентрации в пленке  $\beta$ -HgS толщиной 11,5 мкм [222]

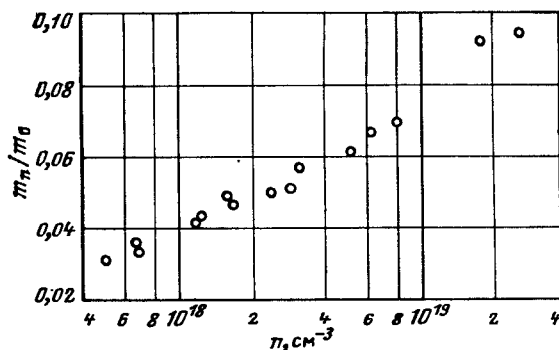


Рис. 22.116. Зависимость эффективной массы электронов в HgSe при  $T=300$  К от их концентрации [224]

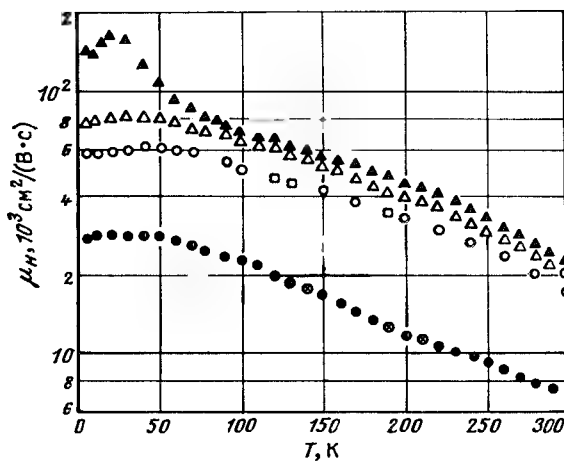


Рис. 22.117. Температурная зависимость подвижности электронов в HgSe [227]. Кристалл подвергался последовательным процессам отжига для получения различных электронных концентраций  $n$ ,  $\text{см}^{-3}$ , при  $T=4,2$  К:  $\blacktriangle$  —  $3,60 \cdot 10^{16}$ ;  $\triangle$  —  $1,89 \cdot 10^{16}$ ;  $\circ$  —  $3,78 \cdot 10^{17}$ ;  $\bullet$  —  $3,92 \cdot 10^{16}$

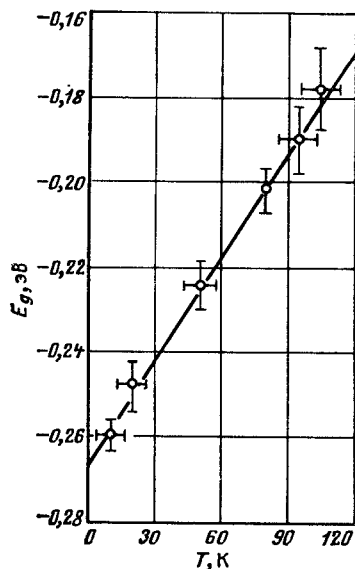


Рис. 22.115. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны в HgSe [223]

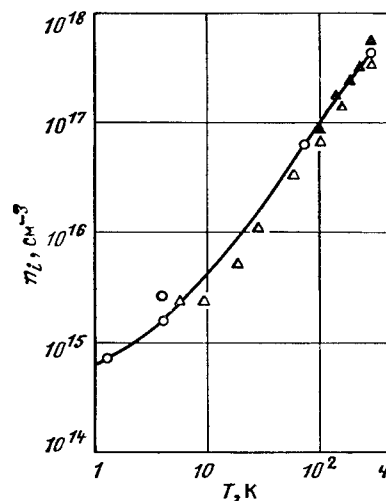


Рис. 22.118. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в HgTe: сплошная линия — расчет [243]; точки — данные разных авторов

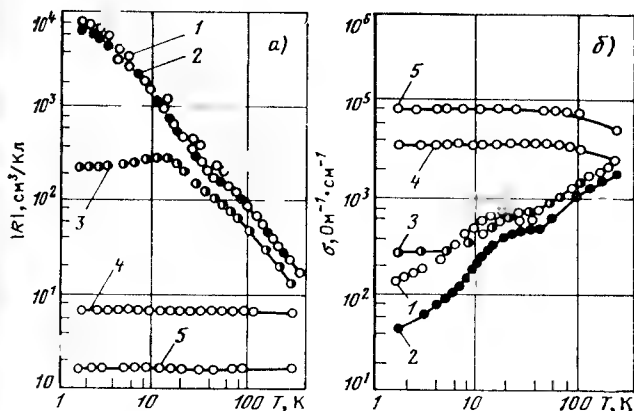


Рис. 22.119. Температурные зависимости коэффициента Холла (а) и проводимости (б) в HgTe [239]: концентрация носителей возрастает от образца 1 к образцу 5

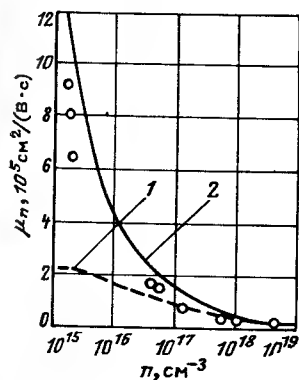


Рис. 22.120. Зависимость подвижности электронов в HgTe при  $T=4,2$  К от их концентрации. Расчет без учета (пунктирная кривая 1) и с учетом (сплошная кривая 2) экранирования заряженных центров за счет межзонных переходов [240]

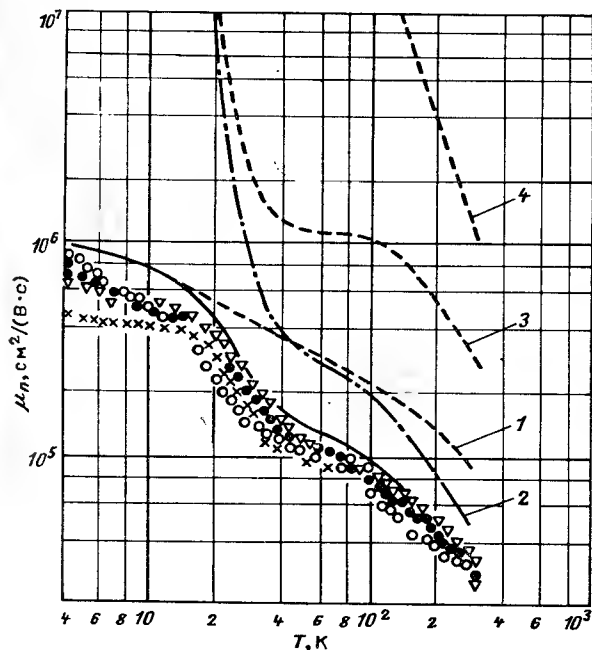


Рис. 22.122. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в HgTe в области собственной проводимости. Расчет с учетом рассеяния дырок на акустических и неполярных оптических фононах (1), неполярных оптических фононах (2) и суммарного рассеяния (3) [245]: точки — данные разных авторов

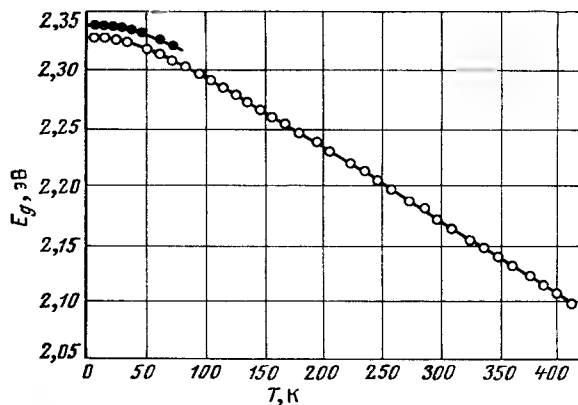
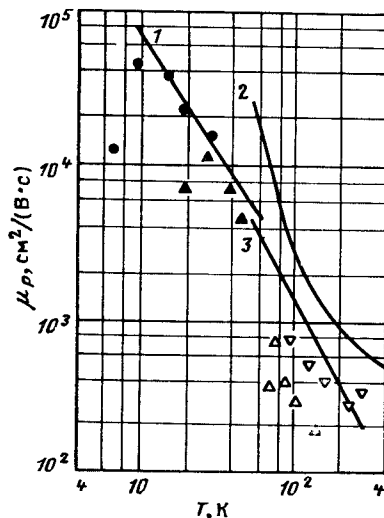


Рис. 22.123. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны HgI₂ [9]:

● — данные по пропусканию; ○ — данные по отражению

Рис. 22.121. Температурная зависимость подвижности электронов в HgTe. Расчет с учетом рассеяния электронов на заряженных центрах (1), полярных оптических (2), неполярных оптических (3) и акустических (4) фононах [244]:

точки — данные разных авторов

### 22.3.3. Соединения типа $A^{III}B^{IV}$ — $A^{III}B^{VI}$

Полупроводники типа  $A^{III}B^V$  характеризуются высокой подвижностью и малой эффективной массой электронов. Эти свойства обеспечивают им широкое применение. Изучены весьма подробно. Кристаллизуются в структуру типа сфалерита  $T_d^2$ . Зоны проводимости имеют, как правило, несколько минимумов, расположенных в точке  $k=0$  и на осях  $[111]$  и  $[100]$ .

В GaN, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb абсолютный минимум  $\Gamma$  расположен в центре зоны Бриллюэна ( $k=0$ ) (см. рис. 22.126), абсолютный минимум  $\Delta$  — на оси  $[100]$  в BP, AlP, AlAs, AlSb (см. рис. 22.127). Числовые значения параметров зонной структуры см. в табл. 22.15.

Валентная зона вырождена при  $k=0$ . Максимум зоны легких дырок  $V_2$  находится в точке  $k=0$ ; максимумы зоны тяжелых дырок  $V_1$  расположены несколько выше (на 0,01—0,001 эВ) и лежат на осях  $[111]$ . Имеется также зона  $V_3$ , отщепленная за счет спин-орбитального взаимодействия  $\Delta_{so}$ .

Полупроводниковые соединения III и VI групп обладают стехиометрическим составом двух типов:  $A^{III}B^{VI}$  и  $A_2^{III}B_3^{VI}$  и имеют много кристаллических модификаций.

Соединения  $A^{III}B^{VI}$  делятся в основном на два класса: 1) с гексагональной структурой  $D_{6h}^4$  (GaS, GaSe, InSe), 2) с тетрагональной структурой  $D_{4h}^{18}$  (InTe, TlS, TlSe, TlTe). Большинство кристаллов  $A^{III}B^{VI}$  имеет сложную структуру.

Соединения  $A_2^{III}B_3^{IV}$  имеют малую подвижность носителей (следствие дефектной структуры  $[150]$ ) и обладают, как правило, проводимостью  $n$ -типа (за счет избыточного числа атомов халькогена). Эти соединения малочувствительны к легированию другими примесными атомами. Многие из этих соединений кристаллизуются в структуры нескольких типов.

О полупроводниковых свойствах халькогенидов редкоземельных элементов — см. [62]. Полупроводниковыми свойствами обладает соединение  $UO_2$ , кристаллизующееся в кубической структуре  $O_h^5$  с  $a=0,546$  нм [1],  $E_g=1,3$  эВ [87],  $\mu_p=10$  см<sup>2</sup>/(В·с) [249].

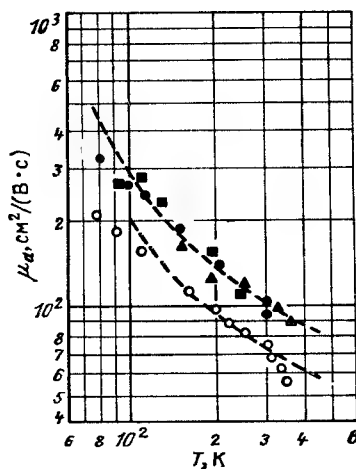


Рис. 22.124. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в  $HgI_2$  [104]:

○ —  $E \perp c$ ; остальные символы —  $E \parallel c$ , образцы различной толщины

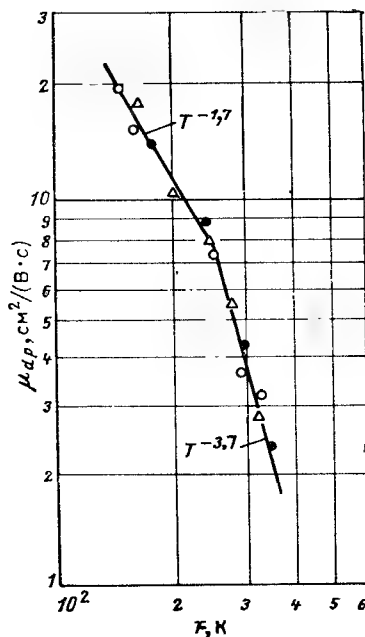


Рис. 22.125. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в  $HgI_2$  [110]:

○ —  $E \perp c$ ; остальные символы —  $E \parallel c$

Таблица 22.14. Электрофизические свойства карбида бора  $B_4C$

| Кристаллическая структура |                                  | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $E_g$ , эВ | $\rho$ , Ом·см | $T_D$ , К  |
|---------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------|------------|----------------|------------|
| Система, группа           | $a$ , с, нм                      |                            |              |            |                |            |
| Ромбоэдр., $D_{3d}^5$     | 0,560 (a);<br>1,212 (c)<br>[242] | 2,52 [216]                 | 2723 [16]    | 1,64 [16]  | 0,1—10 [16]    | 1300 [288] |

Таблица 22.15. Полупроводниковые соединения  $A^{III}B^V$  [292]

| Соединение | Кристаллическая структура |                                   | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К           | $T_D$ , К | $\hbar\omega_I$ , эВ | $\hbar\omega_{II}$ , эВ |
|------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------|----------------------|-------------------------|
|            | Система, группа           | $a$ , нм                          |                            |                        |           |                      |                         |
| BP         | Куб., $T_d^2$             | 0,4538                            | 2,89 [242]                 | 1400<br>( $T_{разл}$ ) | 985       | 0,103                | 0,102                   |
| AlP        | То же                     | 0,547                             | 2,85 [123]<br>2,40         | 2823                   | 538 [178] | 0,062                | 0,0545 [254]            |
| AlAs       | » »                       | 0,566                             | 3,6 [121]<br>3,7           | 2013                   | 417 [121] | 0,050                | 0,0447 [254]            |
| AlSb       | » »                       | 0,614                             | 4,3                        | 1327 [123]             | 292 [121] | 0,042                | 0,0395 [254];           |
| GaN        | Гекс., $C_{6v}^4$         | 0,318 (a);<br>0,5166 (c)<br>[242] | 6,10 [242]                 | 1500 [242]<br>2000     | 600       | —                    | —                       |
| GaP        | Куб., $T_d^2$             | 0,545                             | 4,14                       | 1740                   | 446 [121] | 0,0499               | 0,0455 [254]            |
| GaAs       | То же                     | 0,569 [1]                         | 5,4 [121]                  | 1510 [123]             | 344 [121] | 0,0362               | 0,0354 [254]            |
| GaSb       | » »                       | 0,609 [1]                         | 5,61                       | 985 [123]              | 265 [121] | 0,0298               | 0,0286 [254]            |
| InN        | Гекс., $C_{6v}^4$         | 0,353 (a)<br>0,569 (c)<br>[242]   | 6,88 [242]                 | 1200 [242]<br>1373     | —         | 0,086                | 0,059                   |
| InP        | Куб., $T_d^2$             | 0,586 [1]                         | 4,79 [123]                 | 1327 [123]             | 321 [121] | 0,0435               | 0,038 [254]             |
| InSb       | То же                     | 0,647                             | 5,78 [121]                 | 798 [123]              | 262 [121] | 0,0244               | 0,0229 [254]            |
| InAs       | » »                       | 0,606 [1]                         | 5,68 [121]                 | 1216 [123]             | 249 [121] | 0,030                | 0,0272 [254]            |

Продолжение табл. 22.15

| Соединение | $\epsilon_0$                            | $\epsilon_\infty$                     | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В·с)               | $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /(В·с)      | Абсолютный минимум<br>зоны проводимости |
|------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| BP         | 11,6 [242]                              | —                                     | 30—120                                         | 25—300                                | (100)                                   |
| AlP        | 9,83 [254]                              | 7,56 [254]                            | 50 [28]                                        | 150 [28]                              | (100)                                   |
| AlAs       | 11 [254]                                | 9 [254]                               | 75—300<br>1200 [115]                           | —                                     | (100) [170]                             |
| AlSb       | 11,5 [27]<br>11,6 [254]                 | 11,6 [170]<br>10,2 [254]              | 200 [121]<br>700 (77 K)                        | 420 [27]<br>3700 (77 K)               | (100) [170]                             |
| GaN        | 12,2 [214]                              | 5,8 [214]                             | 380 [214]                                      | —                                     | (000)                                   |
| GaP        | 10,18 [170]                             | 8,46 [170]                            | 300 [123]                                      | 75 [27]                               | (100) [170]                             |
| GaAs       | 10,7 [254]<br>12,53 [170]<br>12,9 [254] | 8,5 [254]<br>11,6 [170]<br>10,9 [254] | 500 (77 K) [27]<br>8500 [27]<br>210 000 (77 K) | 420 (77 K)<br>420 [27]<br>9000 (77 K) | (000) [170]                             |
| GaSb       | 15 [27]<br>16,1 [254]                   | 15,2 [170]<br>14,4 [254]              | 4000 [27]<br>6000 (77 K)                       | 1400 [27]<br>3600 (77 K)              | (000) [170]                             |
| InN        | —                                       | 9,3                                   | 20—200                                         | —                                     | (000)                                   |
| InP        | 14 [27]<br>12,4 [254]                   | 10,9 [170]<br>9,6 [254]               | 4600 [27]<br>40 000 (77 K)                     | 150 [27]<br>1200 (77 K)               | (000) [170]                             |
| InSb       | 16,8<br>17 [27]                         | 15,6 [254]<br>15,7                    | 78 000 [27]<br>1 200 000 (77 K)                | 750 [27]<br>10 000 (77 K)             | (000) [170]                             |
| InAs       | 14,5 [27]<br>14,9 [254]                 | 11,6 [170]<br>12,3 [254]              | 33 000 [27]<br>82 000 (77 K)                   | 460<br>690 (77 K) [27]                | (000) [170]                             |

| Соединение | $E_g$ , эВ           | $E_{\Gamma\Delta}$ , эВ | $E_{\Gamma\Lambda}$ , эВ | $\Delta_{so}$ , эВ      | $\frac{m_n^{(000)}}{m_0}$ | $\frac{m_n^{(111)}}{m_0}$        |
|------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| BP         | 2,0                  | —                       | —                        | —                       | —                         | —                                |
| AlP        | 2,45<br>2,5 (2 K)    | 1,1                     | —                        | —                       | —                         | —                                |
| AlAs       | 2,14<br>2,23 (2 K)   | 1,0<br>1,3 [172]        | —                        | 0,29 [173]              | 0,124                     | —                                |
| AlSb       | 1,63<br>1,69 (4,2 K) | 0,7 [171]               | —                        | 0,75 [170]              | 0,09 [123]                | —                                |
| GaN        | 3,44<br>3,50 (1,6 K) | —                       | —                        | —                       | 0,2—0,4 [214]             | —                                |
| GaP        | 2,27<br>2,35 (0 K)   | 0,35 [170]              | 0,25 [185]               | 0,08<br>0,1 [171]       | 0,12 [123]                | —                                |
| GaAs       | 1,43<br>1,52 (2 K)   | 0,38                    | 0,5 [185]                | 0,33 [170]              | 0,067 [84]                | —                                |
| GaSb       | 0,70<br>0,811 (2 K)  | 0,4 [170]               | 0,08                     | 0,75 [84]<br>0,8 [171]  | 0,047 [170]               | 0,9 [170]<br>0,12 ( )<br>1,3 ( ) |
| InN        | ~ 2,1                | —                       | —                        | —                       | 0,11                      | —                                |
| InP        | 1,34<br>1,42 (2 K)   | 0,7 [170]               | 0,4 [84]                 | 0,1 [171]               | 0,073 [84]                | —                                |
| InSb       | 0,180<br>0,236 (4 K) | —                       | 0,45—0,5 [84]            | 0,98 [170]              | 0,014 [170]               | —                                |
| InAs       | 0,36<br>0,41 (0 K)   | —                       | —                        | 0,38 [84]<br>0,43 [170] | 0,023 [170]               | —                                |

Продолжение табл. 22.15

| Соединение | $\frac{m_n^{(100)}}{m_0}$            | $\frac{m_{p1}}{m_0}$                           | $\frac{m_{p2}}{m_0}$       | $\frac{m_{dp}}{m_0}$ | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ ,<br>$10^{-4}$ эВ/К | $\frac{\partial E_g}{\partial P}$ ,<br>$10^{-11}$ эВ/Па | $g_n$                         |
|------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|
| BP         | —                                    | —                                              | —                          | —                    | —                                                     | —                                                       | —                             |
| AlP        | —                                    | 0,63                                           | 0,20<br>0,39 [173]         | —                    | —                                                     | —                                                       | —                             |
| AlAs       | 0,5 ÷ 0,8                            | 0,5                                            | 0,22 [173]<br>0,26         | —                    | —4                                                    | —                                                       | —                             |
| AlSb       | 0,33<br>0,25 ( ) [84]<br>1; 1,64 ( ) | 0,4 [123]                                      | 0,12 [170]<br>0,137 [173]  | 0,9 [173]            | —3,5<br>—4 [123]                                      | —1,6 [170]<br>(100)                                     | —                             |
| GaN        | —                                    | —                                              | —                          | 0,6 ÷ 1,0<br>[214]   | —3,9 [242]<br>—6,7                                    | —4,2<br>(000)                                           | —                             |
| GaP        | 0,22 ( ) [84]<br>1,15 ( )            | 0,5 [170]<br>0,56 [105]                        | 0,13 [170]<br>0,16         | —                    | —5,5 [170]                                            | —1,7 [170]<br>(100)                                     | —                             |
| GaAs       | 1,2 [170]<br>0,3 ( )<br>2,0 ( )      | 0,475 (231)<br>0,5 (170)                       | 0,89 [232]                 | 0,5 [173]            | —5 (000) [170]<br>—2,4 (100)                          | 12,5 (000) [186]<br>—8,7 (100) [170]                    | 0,52—0,37 [84]<br>0,523 [170] |
| GaSb       | —                                    | 0,23 [123]<br>0,36 ( ) [233]<br>0,26 ( ) [233] | 0,04<br>0,052 [233]        | 0,39 [173]           | —3,5 (000) [170]<br>+2 (111) [123]                    | 14,5 (000)<br>—10 (111)                                 | —9                            |
| InN        | —                                    | —                                              | —                          | —                    | —                                                     | —                                                       | —                             |
| InP        | —                                    | 0,60 [105]                                     | 0,086 [170]<br>0,12 [105]  | —                    | —2,9 [123]<br>—4,6 [170]                              | 4,6 (000) [170]                                         | 1,3 [292]<br>—0,6 [230]       |
| InSb       | —                                    | 0,4 [123]                                      | 0,015 [123]<br>0,020 [231] | 0,2 [173]            | —2,8 [170]<br>—2,9 [123]                              | 15,5 (000) [170]<br>14,2 (000)                          | —50 [170]<br>—48 [84]         |
| InAs       | —                                    | 0,4 [170]                                      | 0,025 [170]                | 0,33 [173]           | —2,2 [170]<br>—3,7 [123]                              | 4,8 (000)<br>8,5 (000) [170]<br>3,2 (111)               | —14,7 [84]                    |

Таблица 22.16. Свойства примесей в соединениях  $A^{III}B^V$  [292]

Продолжение табл. 22.61

| Соединение | $E_D$ , эВ                                                                                                        | $E_A$ , эВ                                                                                                               | Соединение | $E_D$ , эВ                                                                                                     | $E_A$ , эВ                                                                                                                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AlP        | —                                                                                                                 | 0,15 (?)<br>0,37 (?)                                                                                                     | GaSb       | 0,145 (S)<br>0,085 (Se)<br>0,020 (Te) } (111)<br><br>~0,3 (S)<br>0,2 (Se)<br><0,08 (Te) } (100)                | 0,0094 (Si)<br>0,013—0,015 (Ge)<br>0,008—0,130 (?)                                                                                                               |
| AlAs       | 0,05 (Mg)<br>0,06 (Zn)<br>0,07 (Si)                                                                               | —                                                                                                                        | InP        | 0,106 (Tl)<br>0,175 (Si) } (100)                                                                               | 0,031; 0,108 (Mg)<br>0,031; 0,143 (Be)<br>0,041 (C)<br>0,046 (Zn)<br>0,057 (Cd)<br>0,098 (Hg)<br>0,210 (Ge)<br>0,270 (Mn)                                        |
| AlSb       | 0,068 (Te)<br>0,147 (Se)<br>0,160 (?)                                                                             | 0,033 (?)<br>0,041 (?)<br>0,102 (?)                                                                                      | InAs       | 0,020—0,025 (?)                                                                                                | 0,01 (Sn); 0,02;<br>0,035 (?)<br>0,014 (Ge)<br>0,02 (Si)                                                                                                         |
| GaN        | 0,017—0,042 ( $V_N$ )                                                                                             | 0,225 ( $V_{Ga}$ )<br>0,41 (Hg)<br>0,750 (Li)<br>0,37; 0,48; 0,65;<br>1,02; 1,42 (Zn)                                    | InSb       | ~0,007 (S)<br>~0,007 (Se)<br>~0,007 (Te) } (000)<br><br>0,05 (Te)<br>0,15 (Se)<br>0,25 (S)<br>0,55 (?) } (111) | 0,008 (Co)<br>0,0091; 0,0099 (Zn)<br>0,00925 (Ge)<br>0,0095 (Mn)<br>0,0099 (Mg)<br>0,013 (Fe)<br>0,028; 0,056 (Cu)<br>0,030; 0,056 (Ag)<br>0,07 (Cr)<br>0,12 (?) |
| GaP        | 0,061; 0,091 (Li)<br>0,072 (Sn)<br>0,085 (Si)<br>0,105 (Se)<br>0,107 (S)<br>0,204 (Ge)<br>0,897 (O)<br>0,930 (Te) | 0,052 (?)<br>0,054 (C)<br>0,057 (Be)<br>0,060 (Mg)<br>0,070 (Zn)<br>0,102 (Cd)<br>0,210 (Si)<br>0,265 (Ge)<br>0,530 (Cu) |            |                                                                                                                |                                                                                                                                                                  |
| GaAs       | 0,058 (Si, Se, Pb,<br>$V_{Ga}$ )<br>0,059 (Ge, Si, C)                                                             | 0,027 (C)<br>0,028 (Be)<br>0,029 (Mg)<br>0,031 (Zn)<br>0,035 (Si, Cd)<br>0,040 (Ge)<br>0,113 (Mn)<br>0,167 (Sn)          |            |                                                                                                                |                                                                                                                                                                  |

Таблица 22.17. Полупроводниковые соединения  $A^{III}B^{VI}$

| Соединение | Кристаллическая структура |                                                                       | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К                        | $T_D$ , К       | $E_g$ , эВ                   |
|------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------------|
|            | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                                                        |                            |                                     |                 |                              |
| GaS        | Гекс., $D_{6h}^4$         | 0,3585 ( $a$ ); 1,55 ( $c$ ) [150]                                    | 3,75 [288]                 | 1235 [288]                          | 215 [288]       | 3,06 (77 K)                  |
| GaSe       | То же                     | 0,3755 ( $a$ ); 1,594 ( $c$ ) [150]                                   | 5,03 [150]                 | 1211 [294]                          | 190 (0 K) [294] | 2,09 [294]                   |
| GaTe       | Моноклин., $C_2^1$        | 1,744 ( $a$ ); 1,046 ( $b$ );<br>0,4077 ( $c$ ) [294]                 | 5,44 [150]                 | 1097 [294]<br>1108 [150]            | 158 [294]       | 1,7 [152]<br>1,8 (0 K) [294] |
| InS        | Орторомб., $D_{2h}^{13}$  | 0,394 ( $n$ ); 0,444 ( $b$ );<br>1,064 ( $c$ ) [150]                  | 5,18 [150]                 | 965 [150]                           | —               | 1,9 [294]<br>2,07 (4,2 K)    |
| InSe       | Гекс., $D_{6h}^4$         | 0,400 ( $a$ ); $c$ : 1,670 ( $c$ );<br>$\gamma$ : 2,495 ( $c$ ) [294] | 5,55—5,72 [150]            | 888 [288]<br>933 [150]              | 190 [294]       | 1,18<br>1,32 (30 K) [294]    |
| InTe       | Тетр., $D_{4h}^{18}$      | 0,8437 ( $a$ ); 0,7139 ( $c$ ) [150]                                  | 6,29 [150]                 | 966 [150]                           | —               | 0,26—0,36 [288]              |
| TlS        | То же                     | 0,779 ( $a$ ); 0,679 ( $c$ ) [150]                                    | 7,61 [150]                 | 623 [150]                           | —               | 1,36 [294]                   |
| TlSe       | » »                       | 0,803 ( $a$ ); 0,701 ( $c$ ) [150]                                    | 8,2 [288]                  | 607 [288]                           | 180 [294]       | 0,75 [294]                   |
| TlTe       | » »                       | 1,294 ( $a$ ); 0,6158 ( $c$ ) [150]                                   | 8,15 [294]<br>8,42 [150]   | 623 [294]<br>573 [288]<br>603 [150] | —               | 0,7 [32]                     |

| Соединение | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ ,<br>$10^{-3}$ эВ/Па<br>( $10^{-6}$ эВ/ат) | $m_n/m_0$                                                        | $m_p/m_0$                                                        | $\mu_n$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В·с)                 | $\mu_p$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В·с)              | $\epsilon_0$ [294]                                 | $\epsilon_\infty$ [294]                                |
|------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| GaS        | —7,2 [288]                                                                   | 5 [288]                                                          | —                                                                | 12 [294]                                            | 80 [294]                                         | 5,9 ( $E \parallel c$ )<br>10,0 ( $E \perp c$ )    | 5,3 ( $E \parallel c$ )<br>6,7 ( $E \perp c$ )         |
| GaSe       | —4 [10]                                                                      | 0,51 [288]<br>0,5 ( $\perp$ ) [294]<br>1,6 ( $\parallel$ ) [294] | 1,34 [288]<br>0,8 ( $\perp$ ) [294]<br>0,2 ( $\parallel$ ) [294] | 80 ( $\parallel c$ ) [294]<br>300 ( $\perp c$ )     | 210 ( $\parallel c$ ) [294]<br>60 ( $\perp c$ )  | 6,18 ( $E \parallel c$ )<br>10,6 ( $E \perp c$ )   | 5,76 ( $E \parallel c$ ) [294]<br>7,44 ( $E \perp c$ ) |
| GaTe       | —(4—5) [294]                                                                 | —                                                                | 1,34 [288]                                                       | 50 [31]<br>$\frac{\mu_n}{\mu_p} \simeq 10$<br>[288] | 15 [152]<br>40 [150]                             | 10,58 ( $E \parallel c$ )<br>9,66 ( $E \perp c$ )  | 7,29 ( $E \parallel c$ ) [294]<br>6,97 ( $E \perp c$ ) |
| InS        | —6 [10]<br>—7,9 [294]                                                        | 0,4 [294]                                                        | —                                                                | 50 [294]                                            | —                                                | —                                                  | 15,2 [294]                                             |
| InSe       | —4,2 [288]                                                                   | 0,12—0,16 [294]                                                  | 0,5 ( $\perp c$ ) [294]<br>1,5 ( $\parallel c$ )                 | 900 [294]                                           | $1,4 \cdot 10^7 T^{-2/3}$<br>( $\perp c$ ) [294] | 5,4 ( $E \parallel c$ )<br>8,6 ( $E \perp c$ )     | 4,9 ( $E \parallel c$ ) [294]<br>6,2 ( $E \perp c$ )   |
| InTe       | —                                                                            | 0,09 [294]                                                       | 0,26 [294]                                                       | $\frac{\mu_n}{\mu_p} = 0,75$<br>[294]               | 150 [294]                                        | —                                                  | 14,7 ( $E \parallel c$ ) [294]<br>14 ( $E \perp c$ )   |
| TlS        | —                                                                            | 0,07 [294]                                                       | 0,11 ( $m_{dp}$ ) [294]                                          | $\frac{\mu_n}{\mu_p} = 0,4$<br>[294]                | 20 [294]                                         | —                                                  | —                                                      |
| TlSe       | —4,5 [288]<br>—3,9 [32]                                                      | 0,3 ( $m_{dn}$ ) [32]                                            | 0,6 ( $m_{dp}$ ) [32]                                            | $\frac{\mu_n}{\mu_p} \simeq 0,4$<br>[288]           | 15—150 [288]                                     | 15—20 ( $E \parallel c$ )<br>34—44 ( $E \perp c$ ) | 12 [294]                                               |
| TlTe       | —                                                                            | 0,03 ( $m_{dn}$ ) [294]                                          | 0,5 ( $m_{dp}$ ) [294]                                           | —                                                   | 60 [294]<br>1120 (4,2 K)                         | —                                                  | —                                                      |

Таблица 22.18. Полупроводниковые соединения  $A_2^{III}B_3^{VI}$ 

| Соединение                                              | Кристаллическая структура |                                                                          | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $E_g$ , эВ              | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ ,<br>$10^{-4}$ эВ/К | $\mu_n$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В·с) |
|---------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                         | Система,<br>группа        | $a, b, c$ , нм                                                           |                            |              |                         |                                                       |                                     |
| $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | Гекс., $D_{3d}^6$         | 0,4758 ( $a$ ); 1,295 ( $c$ ) [242]                                      | —                          | 2323 [242]   | 2,5 [242]               | —                                                     | —                                   |
| $\alpha$ -Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                | Гекс., $C_6^2$            | 2,3—2,5 [288]                                                            | 2,32 [242]                 | 1373 [242]   | 4,1 [242]               | —11,5 [242]                                           | —                                   |
| $\alpha$ -Al <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>               | Моноклин., $C_3^4$        | 1,168 ( $a$ ); 0,673 ( $b$ ); 0,733 ( $c$ ); $\beta = 121,1^\circ$ [150] | 3,91 [150]                 | 1253 [150]   | 3,1 [150]               | —11,2 [10]                                            | —                                   |
| Al <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>                         | Гекс., $C_{6v}^4$         | 0,408 ( $a$ ); 0,694 ( $c$ ) [150]                                       | 4,5 [150]                  | 1168 [150]   | 2,2 [150]<br>2,3 [123]  | —                                                     | —                                   |
| $\beta$ -Ga <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                 | То же                     | 0,3685 ( $a$ ); 0,6028 ( $c$ ) [288]                                     | 3,65—3,74 [150]            | 1398 [150]   | 2,84 [123]              | —7 [58]                                               | 28 [150]                            |
| $\alpha$ -Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>               | Моноклин., $C_3^4$        | 1,114 ( $a$ ); 0,641 ( $b$ ); 0,704 ( $c$ ); $\beta = 121,2^\circ$ [150] | 4,92 [150]                 | 1293 [150]   | 1,75 [150]              | —5 [16]                                               | 10 [16]                             |
| $\alpha$ -Ga <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> <sup>*1</sup> | Куб., $T_d^2$             | 0,589 ( $a$ ) [150]                                                      | 5,57 [150]                 | 1065 [150]   | 1,56 [31]<br>1,4 [150]  | —6 [242]                                              | 340 [123]                           |
| In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>**</sup>            | Куб.                      | 1,012 ( $a$ ) [132]                                                      | 7,04 [132]                 | 2270 [132]   | 2,8 [132]               | —8 [132]                                              | 270 [60]                            |
| $\beta$ -In <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                 | Куб., $O_h^5$             | 1,072 ( $a$ ) [150]                                                      | 5,92 [150]                 | 1363 [150]   | 1,1 [150]               | —7 [10]                                               | <100 [150]                          |
| $\alpha$ -In <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>               | Гекс.                     | 1,60 ( $a$ ); 1,924 ( $c$ ) [150]                                        | 5,67 [150]                 | 1173 [150]   | 1,2 [10]                | —4 [10]                                               | 125 [150]                           |
| $\alpha$ -In <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> <sup>**</sup> | Куб., $T_d^2$             | 1,840 ( $a$ ) [121]                                                      | 5,8 [121]                  | 940 [150]    | 1,02 [150]<br>1,12 [16] | —4 [242]                                              | 10 [150]<br>15—70 [16]              |

<sup>\*1</sup>  $\mu_p = 26$  см<sup>2</sup>/(В·с);  $m_n/m_0 = 0,39$ ;  $m_p/m_0 = 0,23$  [123].<sup>\*\*</sup>  $m_{dn}/m_0 = 0,53$  [60].<sup>\*\*</sup>  $m_n/m_0 = 0,7$ ;  $m_p/m_0 = 1,1$  [150].

Таблица 22.19. Электрофизические свойства галогенидов таллия [294]

| Соединение | Кристаллическая структура |          | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $T_D$ , К | $E_g$ , эВ      | $m_n/m_0^*$ | $m_p/m_0^*$ | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В·с) | $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /(В·с) | $\epsilon_0$ | $\epsilon_\infty$ |
|------------|---------------------------|----------|----------------------------|--------------|-----------|-----------------|-------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|-------------------|
|            | Система, группа           | $a$ , нм |                            |              |           |                 |             |             |                                  |                                  |              |                   |
| TlCl       | Куб., $O_h^5$             | 0,384    | 7,02                       | 704          | 393       | 3,2             | 0,5—0,7     | 0,6—1       | 20<br>5000 (4,2 К)               | 67 000<br>(4,8 К)                | 32,7         | 4,76              |
| TlBr       | То же                     | 0,399    | 7,45                       | 733          | 290       | 2,64<br>(4,2 К) | 0,5         | 0,7         | 30<br>40 000<br>(1,8 К)          | 4<br>35 000<br>(1,8 К)           | 30,6         | 5,34              |

\* Полярная масса.

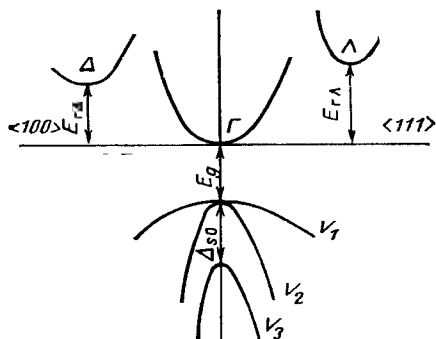


Рис. 22.126. Зонная структура GaN, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb [121, 170, 171]

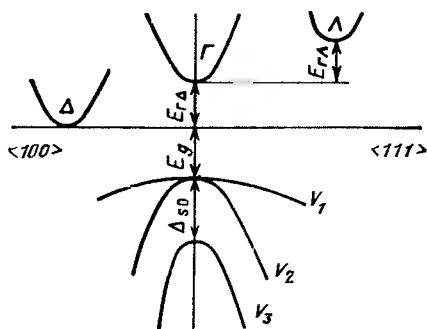


Рис. 22.127. Зонная структура BP, AlP, AlAs, AlSb [121, 170—172]

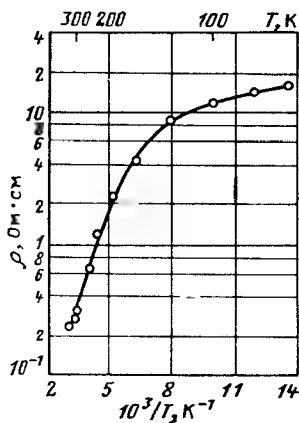


Рис. 22.128. Температурная зависимость удельного сопротивления монокристалла n-BP [247]

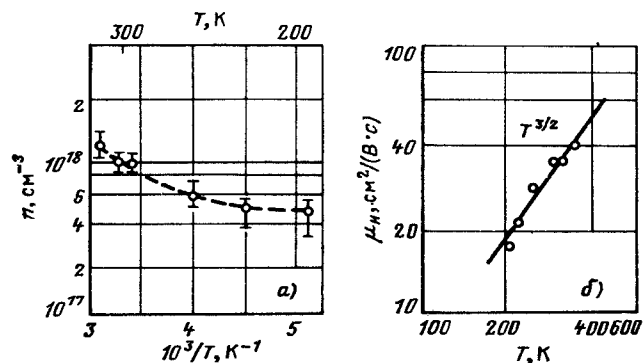


Рис. 22.129. Температурные зависимости концентрации электронов (а) и их холловской подвижности (б) в монокристалле BP [247]

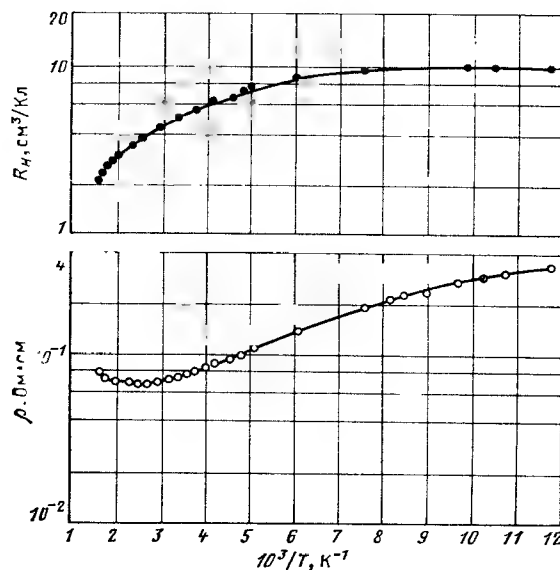


Рис. 22.130. Температурные зависимости коэффициента Холла и удельного сопротивления n-AlP [248]



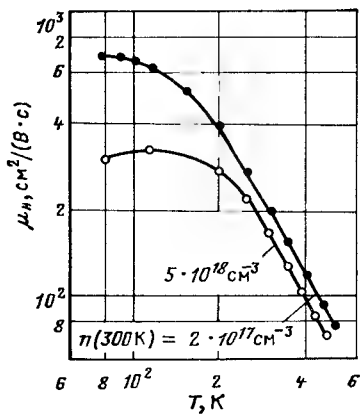


Рис. 22.131. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в AlSb [250]

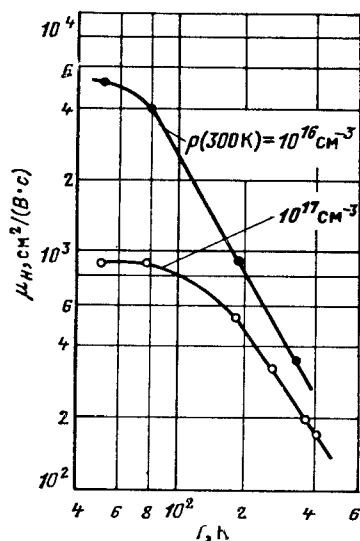


Рис. 22.132. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в AlSb [251]

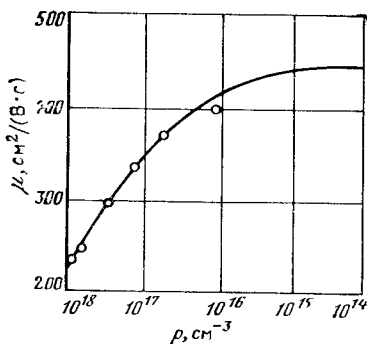


Рис. 22.133. Зависимость подвижности дырок в AlSb при  $T=293$  К от их концентрации [170]: сплошная линия — расчет для комбинированного рассеяния на акустических фоновых и ионизированных примесях

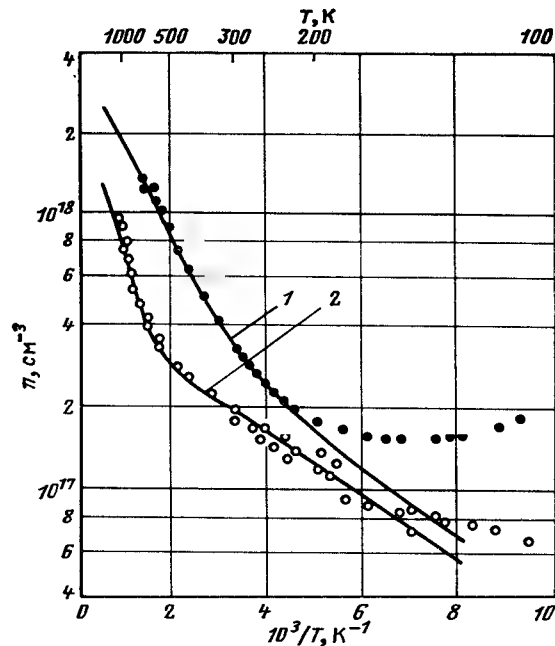


Рис. 22.134. Температурная зависимость концентрации электронов для кристаллических пленок GaN [253]: сплошные линии — расчет по модели с двумя типами доноров; 1, 2 — скорость роста 0,75 и 0,45 мкм/мин соответственно

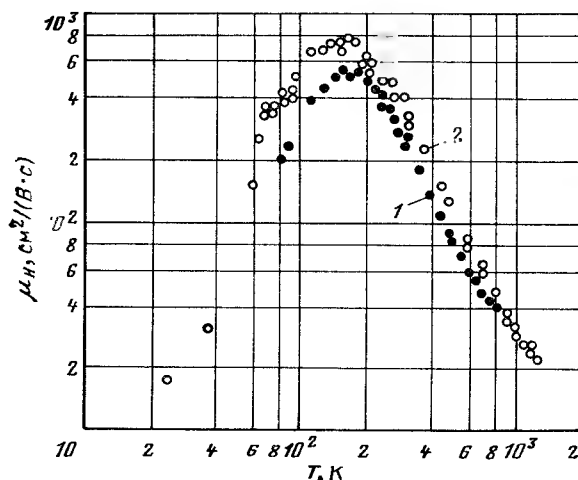


Рис. 22.135. Температурная зависимость холловской подвижности электронов для двух кристаллов GaN [253]: кристаллы те же, что на рис. 22.134

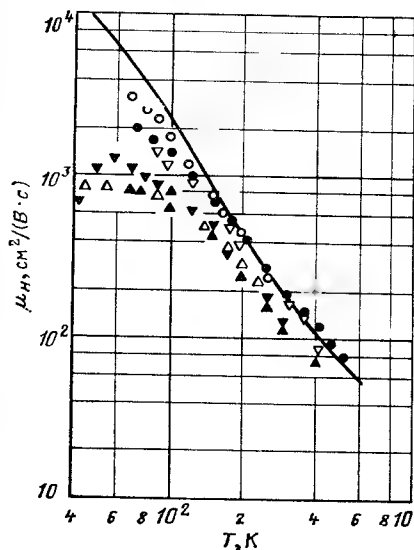


Рис. 22.136. Температурные зависимости холловской подвижности электронов в различных кристаллах GaP [256]:

точки — данные разных работ; сплошная линия — расчет

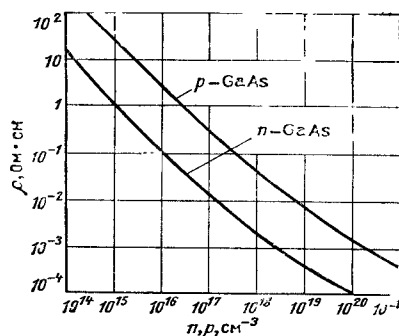


Рис. 22.138. Зависимости удельного сопротивления  $p$ - и  $n$ -GaAs при  $T=300$  К от концентрации электронов или дырок [257]

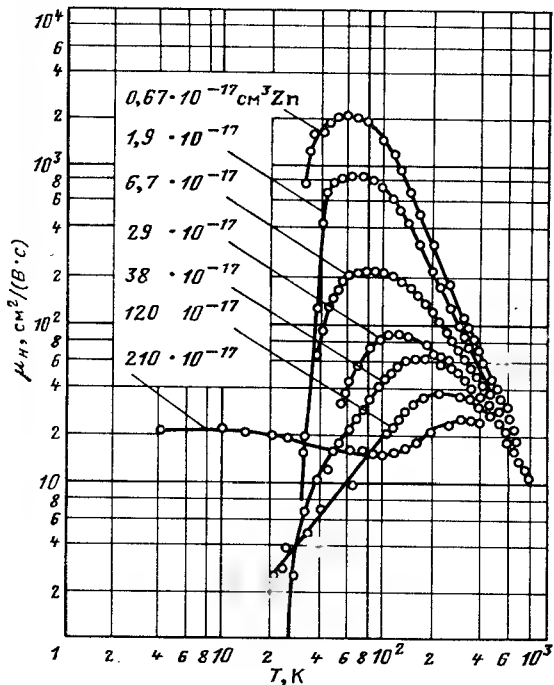


Рис. 22.137. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в различных легированных Zn кристаллах GaP при разной концентрации Zn [256]

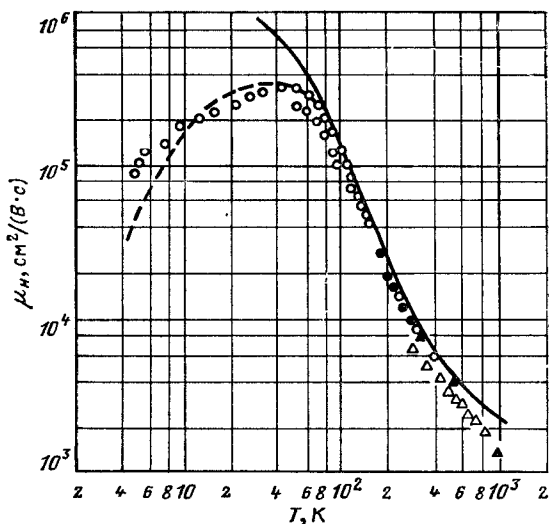


Рис. 22.139. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в GaAs:

линии — расчет без учета (—) и с учетом (---) рассеяния электронов на ионизированных примесях; точки — данные разных работ [258]

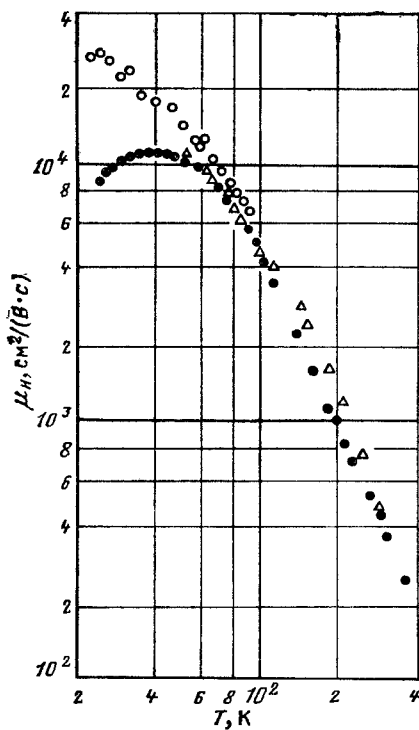


Рис. 22.140. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в GaAs [259]: концентрация акцепторов и доноров  $N_A$  и  $N_D$ ,  $10^{14}$  см $^{-3}$ : ○ — 3,3 и 1,8; △ — 11 и 3; ● — 7 и 5,5

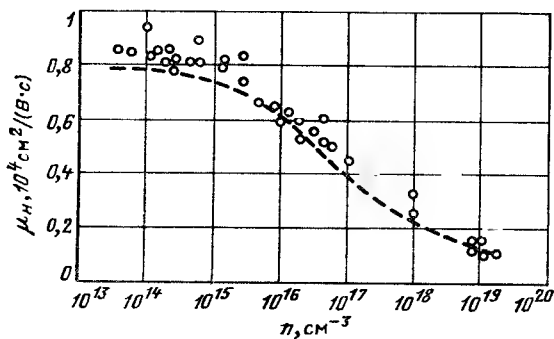


Рис. 22.141. Зависимость холловской подвижности электронов при  $T=300$  К от концентрации электронов в легированных Sn кристаллах GaAs: линия — расчет [260]

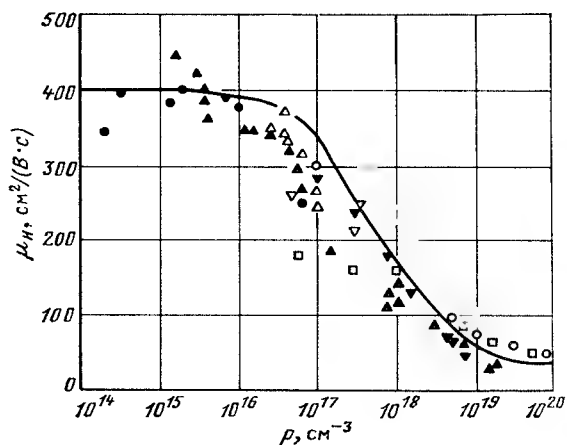


Рис. 22.142. Зависимость холловской подвижности дырок при  $T=300$  К от концентрации дырок в GaAs: сплошная линия — расчет [259]; точки — данные разных работ

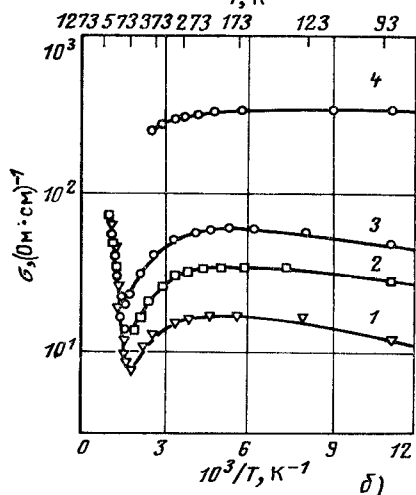
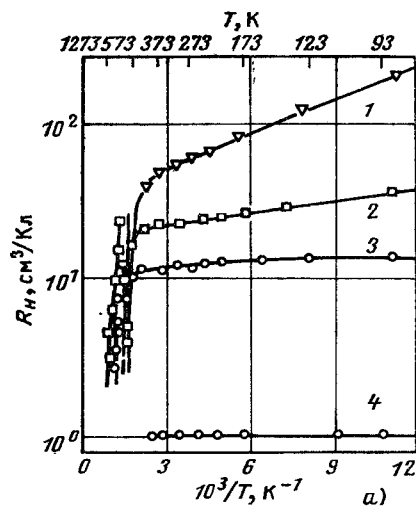


Рис. 22.143. Температурные зависимости коэффициента Холла (а) и проводимости (б) кристаллов GaSb [170]: концентрация растет от 1 к 4

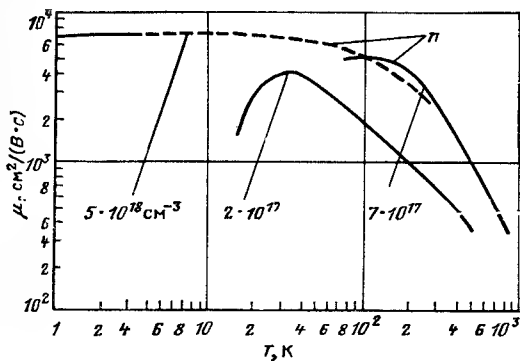


Рис. 22.144. Температурные зависимости подвижности носителей в GaSb с различной концентрацией носителей  $n$ - и  $p$ - (нижняя кривая) типа [127]

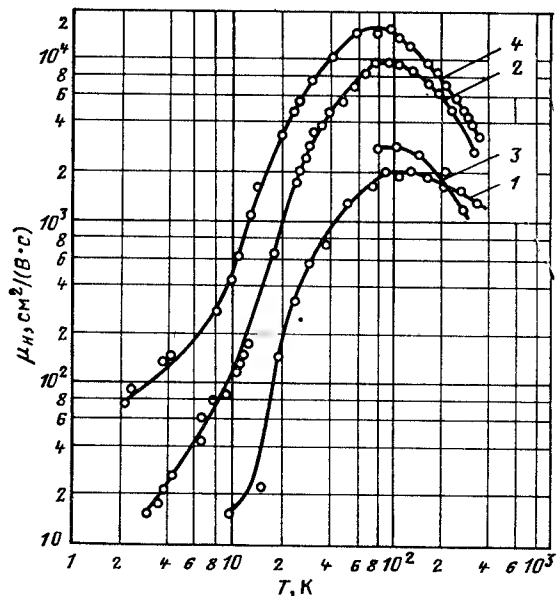


Рис. 22.146. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в InP [262]:  $n$  (300 K),  $10^{15}$  см $^{-3}$ : 1—2 (Cu); 2—5 (Fe); 3—5 (Te, Cu); 4—10 (Co)

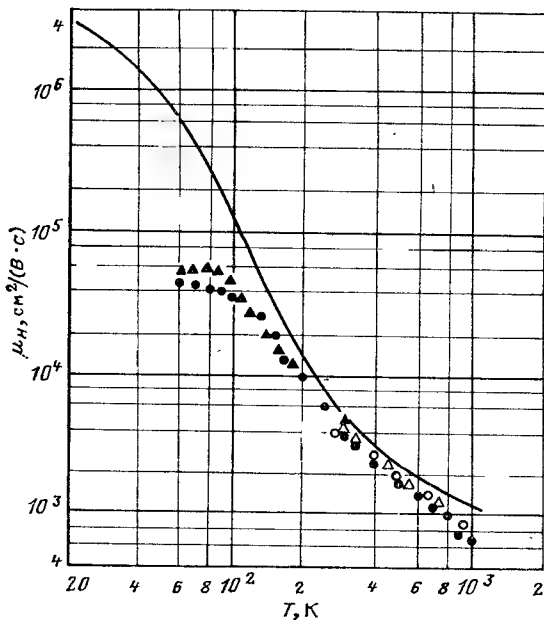


Рис. 22.145. Температурная зависимость холловской подвижности электронов InP: сплошная линия — расчет [261];  $n$  (300 K),  $10^{15}$  см $^{-3}$ : ● — 2; △ — 1,7; ○ — 4; △ — 6

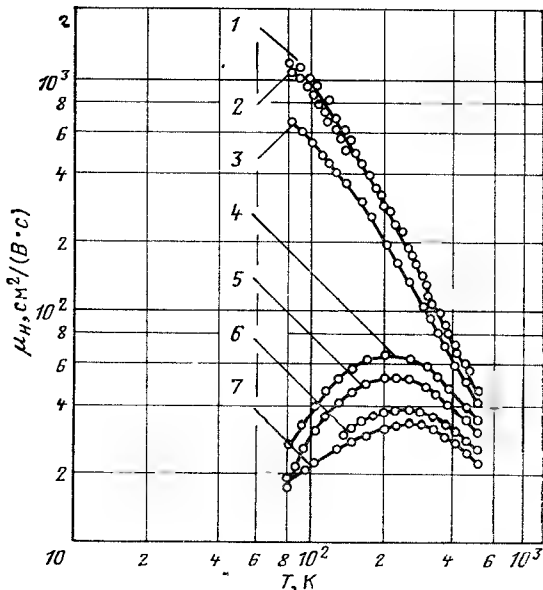


Рис. 22.147. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в InP [263]:  $p$  (300 K),  $10^{17}$  см $^{-3}$ : 1—0,7; 2—1; 3—3; 4—13; 5—30; 6—56; 7—85

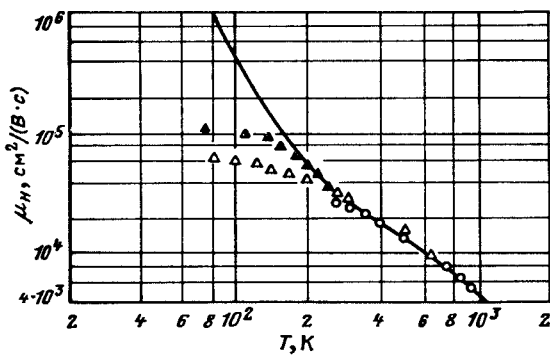


Рис. 22.148. Температурные зависимости холловской подвижности электронов в InAs: сплошная линия — расчет [255];  $n$  (300 К),  $10^{16}$  см $^{-3}$ ;  $\triangle$  — 1,7;  $\circ$  — 4;  $\blacktriangle$  — 0,4

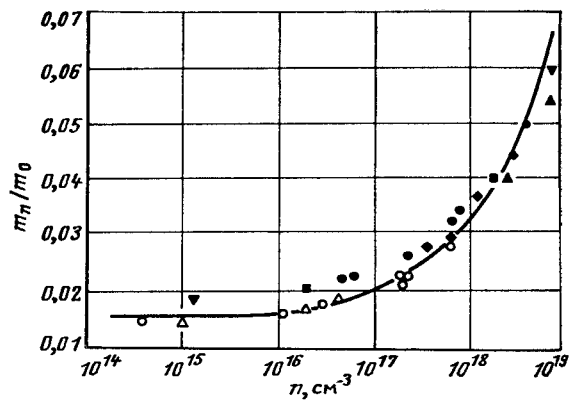


Рис. 22.151. Зависимость эффективной массы электронов в  $n$ -InSb от концентрации электронов [264]: сплошная линия — расчет по теории Кейна; точки — данные из разных работ

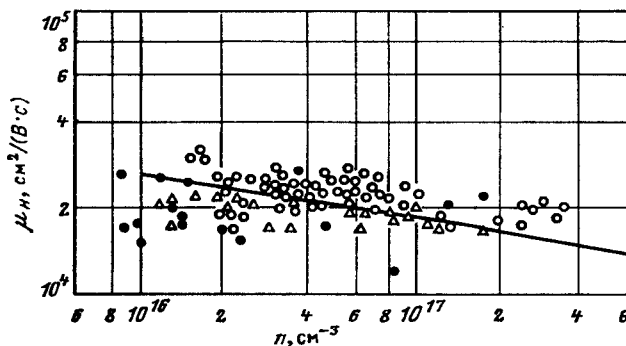


Рис. 22.149. Зависимость холловской подвижности электронов при  $T=300$  К от концентрации электронов в кристаллах InAs с различной степенью компенсации  $K=N_A/N_D$  [247]: сплошная линия — расчет;  $\circ$  —  $K < 0,15$ ;  $\triangle$  —  $0,15 < K < 0,3$ ;  $\bullet$  —  $K > 0,3$

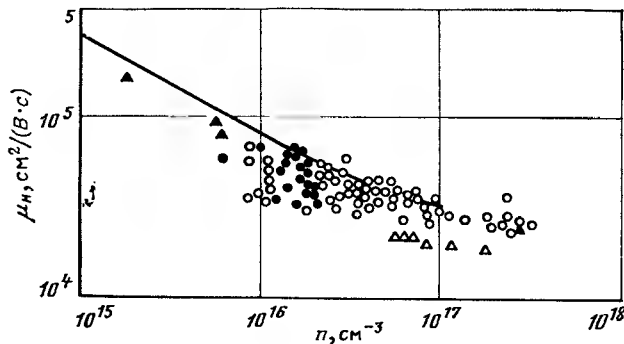


Рис. 22.150. Зависимость холловской подвижности электронов при  $T=77$  К от концентрации электронов в кристаллах InAs [247]: сплошная линия — расчет;  $\bullet$  — нелегированный образец;  $\circ$  — легирован Cu;  $\triangle$  — легирован Sn-Zn;  $\blacktriangle$  — эпитаксиальные пленки

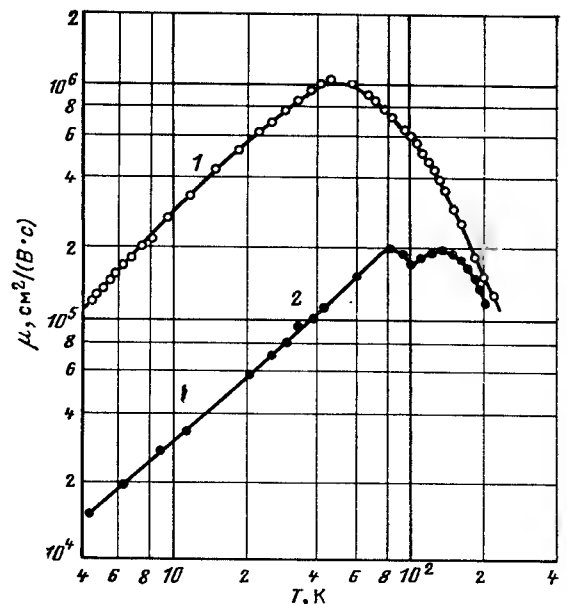


Рис. 22.152. Температурные зависимости подвижности электронов в чистом (1) и легированном (2) (концентрация примеси  $> 10^{14}$  см $^{-3}$ ) кристаллах InSb [265]

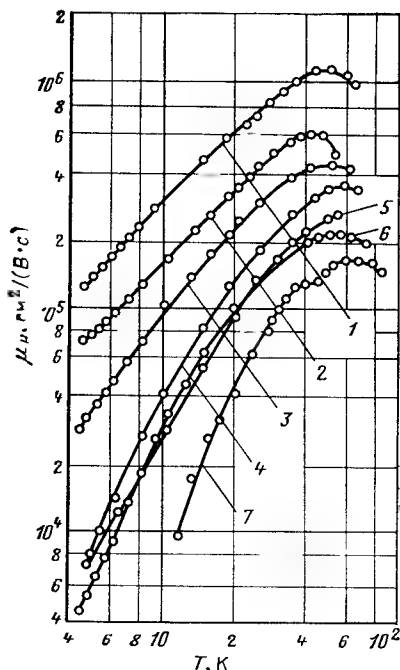


Рис. 22.153. Температурные зависимости подвижности электронов в кристаллах InSb с различной концентрацией примесей [266]:

| № образца | $N_D - N_A$ , $\text{см}^{-3}$ | $N_D + N_A$ , $\text{см}^{-3}$ | $N_A / N_D$ | $\mu_n$ (30 K), $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
| 1         | $1,2 \cdot 10^{14}$            | $6,5 \cdot 10^{14}$            | 0,50        | 830 000                                                 |
| 2         | $1,9 \cdot 10^{14}$            | $1,3 \cdot 10^{15}$            | 0,75        | 480 000                                                 |
| 3         | $9,8 \cdot 10^{13}$            | $1,6 \cdot 10^{15}$            | 0,88        | 330 000                                                 |
| 4         | $1,4 \cdot 10^{13}$            | $2,3 \cdot 10^{15}$            | 0,99        | 160 000                                                 |
| 5         | $1,6 \cdot 10^{13}$            | $2,6 \cdot 10^{15}$            | 0,99        | 150 000                                                 |
| 6         | $3,6 \cdot 10^{12}$            | $1,9 \cdot 10^{15}$            | 0,98        | 150 000                                                 |
| 7         | $6,2 \cdot 10^{11}$            | $2,7 \cdot 10^{15}$            | 0,99        | 92 000                                                  |

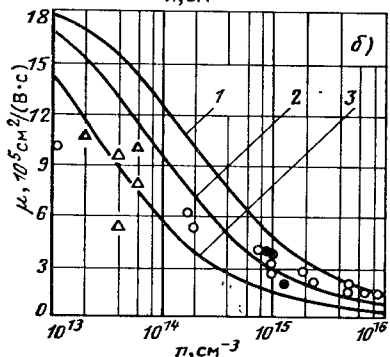
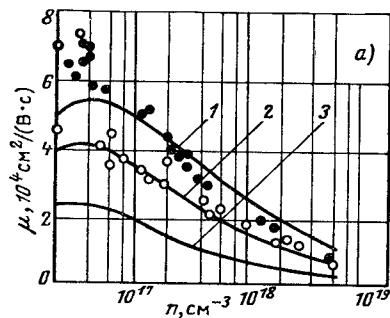


Рис. 22.155. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в InSb [268]

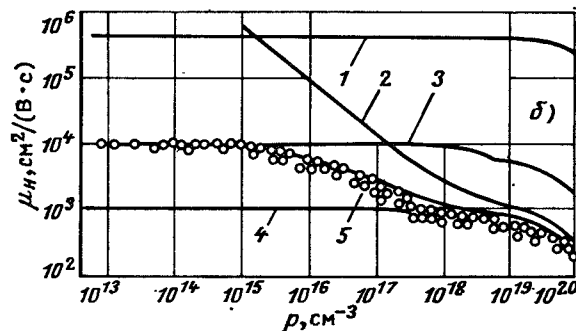
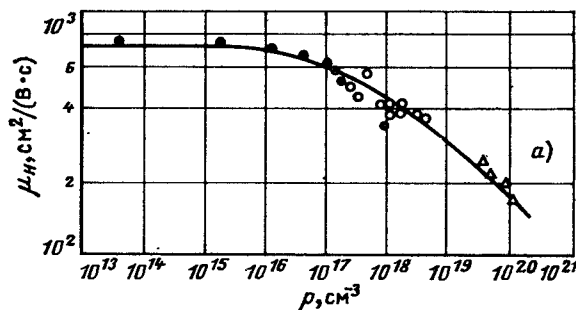
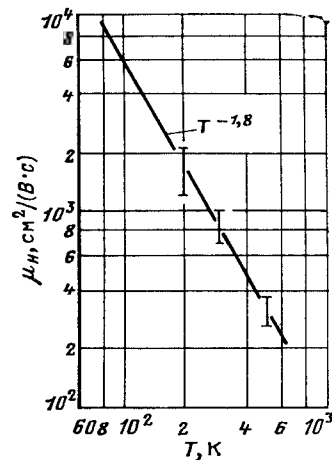


Рис. 22.156. Зависимости подвижности дырок в InSb при  $T=290$  К (а) и  $T=77$  К (б) от концентрации дырок [268—270]:

сплошные линии (б) — расчет с учетом рассеяния дырок на оптических фононах (1), примесных ионах (2), акустических фононах (3— $E_1=7$  эВ; 4— $E_1=21$  эВ), примесях и акустических фононах (5); точки — данные из разных работ

Рис. 22.154. Зависимости подвижности электронов в InSb при  $T=300$  К (а) и  $T=77$  К (б) от концентрации электронов [267]:

сплошные линии — расчетные зависимости дрейфовой подвижности при значениях  $(N_D + N_A)/(n+p)=1$  (1); 2 (2); 5 (3); точки — данные из разных работ

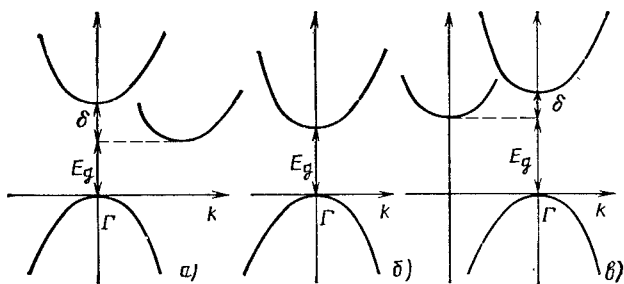


Рис. 22.157. Зонная структура GaS, GaSe, InS, TlS (а), GaTe (б), InSe (в) [294]:

| Соединение | GaS | GaSe  | GaTe | InS  | InSe  | TlS |
|------------|-----|-------|------|------|-------|-----|
| $E_g$ , эВ | —   | 0,025 | —    | 0,55 | 0,076 | 0,2 |

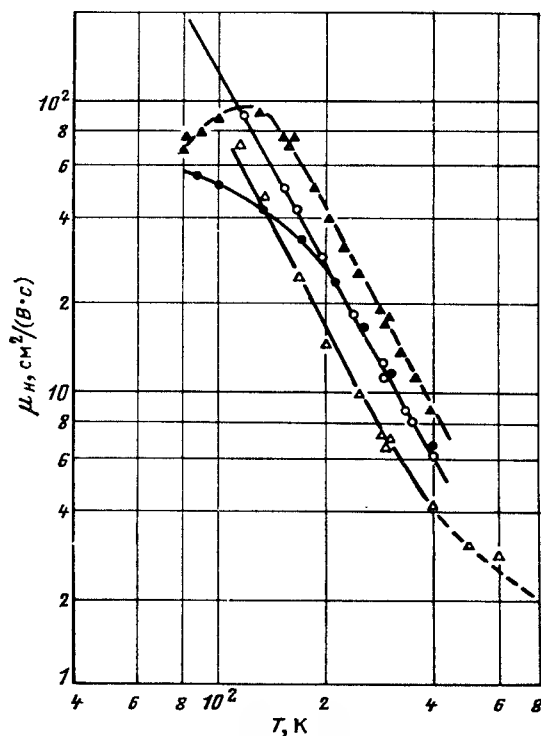


Рис. 22.159. Температурная зависимость холловской подвижности носителей в кристаллах GaS (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев).

Метод получения и тип кристалла:

▲ — подный транспорт, n-тип; ● — осаждение из газовой фазы, n-тип; △, ○ — осаждение из газовой фазы, p-тип [272, 273]

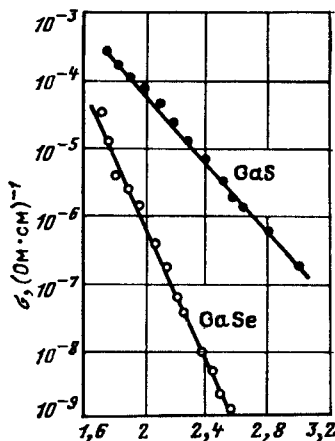


Рис. 22.158. Температурные зависимости проводимости кристаллов n-GaS и n-GaSe в плоскости слоев [271]

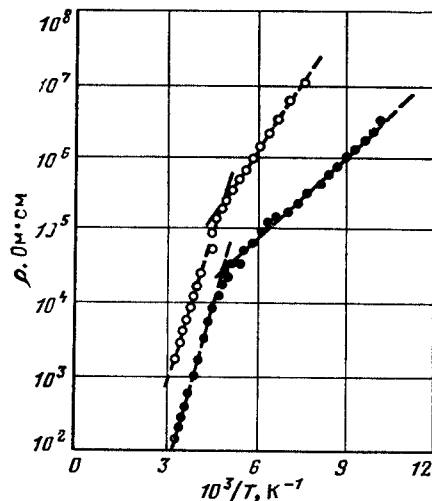


Рис. 22.160. Температурные зависимости удельного сопротивления кристалла GaS вдоль (●) и поперек (○) слоев [274]

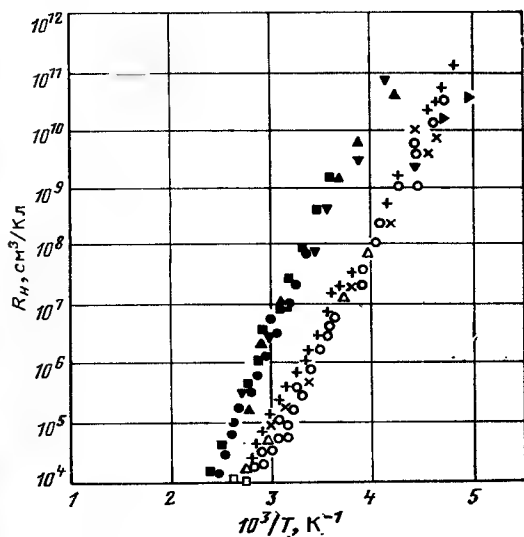


Рис. 22.161. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов  $p$ -GaSe (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев) [275]:  
 $\times$ ,  $+$ ,  $\circ$ ,  $\Delta$ ,  $\square$  — нелегированные кристаллы GaSe; легирующая добавка:  $\blacksquare$ ,  $\bullet$  — 10% Ge;  $\blacktriangle$ ,  $\blacktriangledown$  — 5% Sn;  $\blacktriangleright$  —  $10^{-3}\%$  Zn

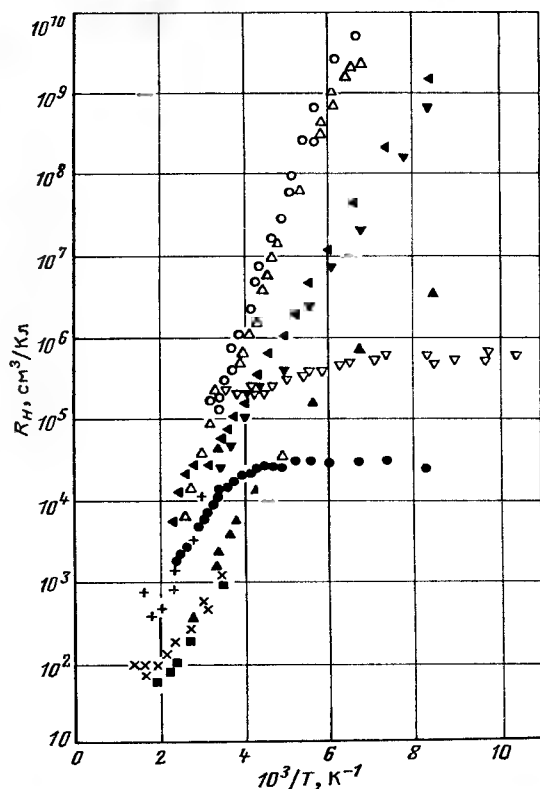


Рис. 22.162. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов  $p$ -GaSe (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев) [275]:  
 $\circ$ ,  $\Delta$ ,  $\bullet$  — нелегированные кристаллы GaSe; легирующая добавка:  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$  — 10% Zn;  $\blacktriangledown$  — 0,5% Zn;  $\blacktriangle$  — 0,1% Zn;  $\blacksquare$ ,  $\times$  —  $10^{-2}\%$  Zn;  $+$  —  $3 \cdot 10^{-3}\%$  Zn

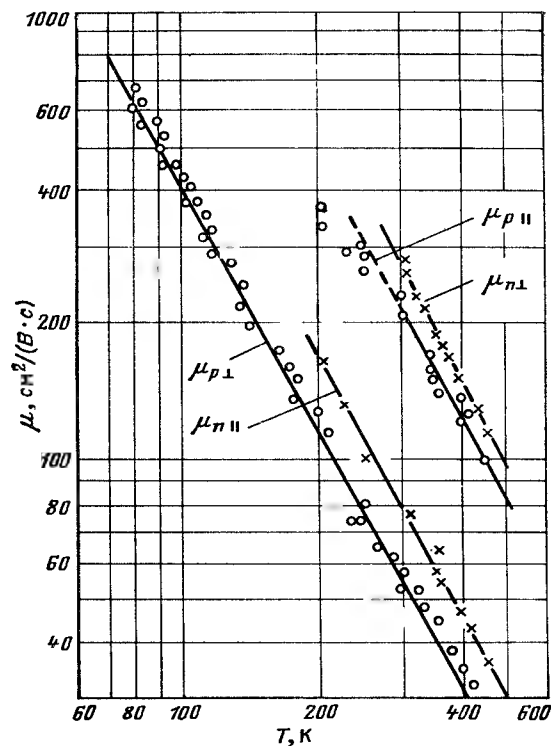


Рис. 22.163. Температурные зависимости подвижности носителей в GaSe [276]:  
 $\mu_{p\perp}$ ,  $\mu_{n\perp}$ ,  $\mu_{p\parallel}$ ,  $\mu_{n\parallel}$  — холловские подвижности дырок и электронов вдоль и поперек слоев

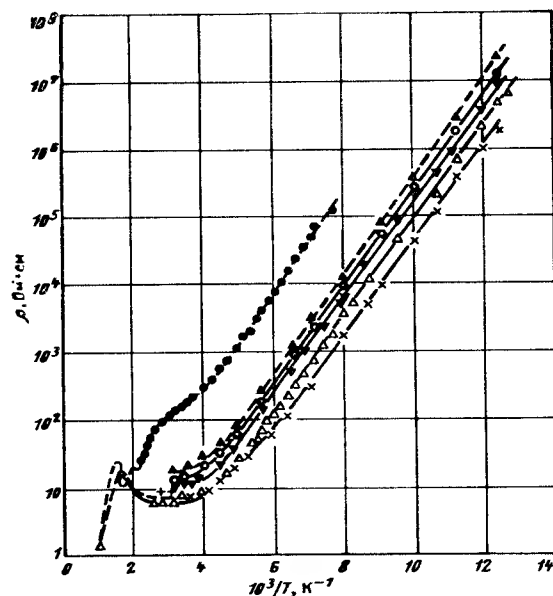


Рис. 22.164. Температурные зависимости удельного сопротивления различных кристаллов GaTe [277]:  
 зачерненные символы — поперек слоев, остальные символы — вдоль слоев; кристаллы:  $\bullet$ ,  $\Delta$  — травление;  $\blacktriangledown$  — слабое травление,  $\blacktriangle$ ,  $\circ$  — холодная обработка;  $\times$  — легирование Cu



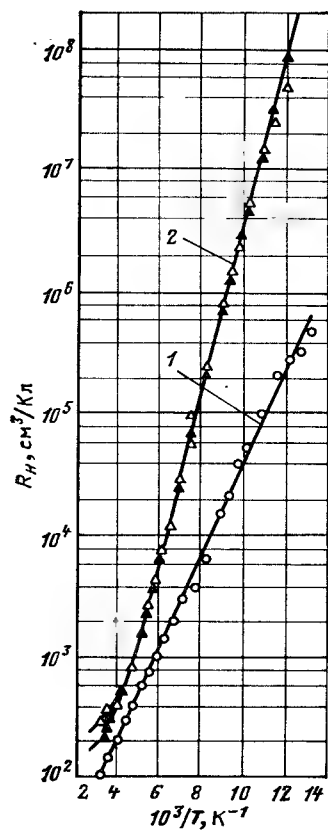


Рис. 22.165. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов GaTe (ток — вдоль слоев; магнитное поле — поперек слоев) [278]: образцы 1 и 2 — из различных партий

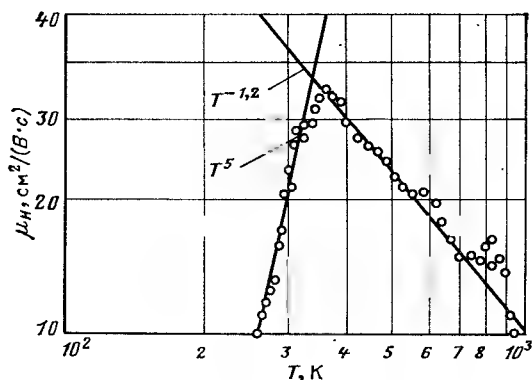


Рис. 22.166. Температурная зависимость подвижности электронов в поликристаллических образцах GaTe, состоящих из больших монокристаллических областей (ток — вдоль слоев) [279]

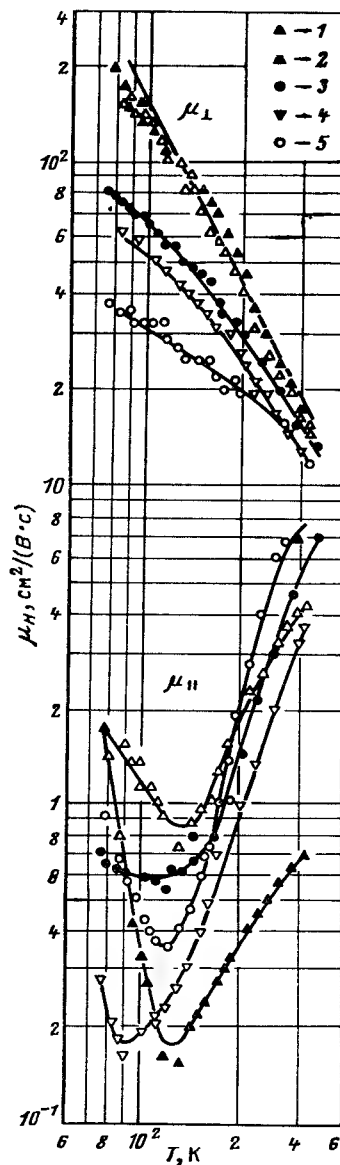


Рис. 22.167. Температурная зависимость холловской подвижности дырок для кристаллов p-GaTe [278]:

$\mu_1$  — вдоль слоев;  $\mu_p$  — поперек слоев; концентрация носителей растет от 1 к 5

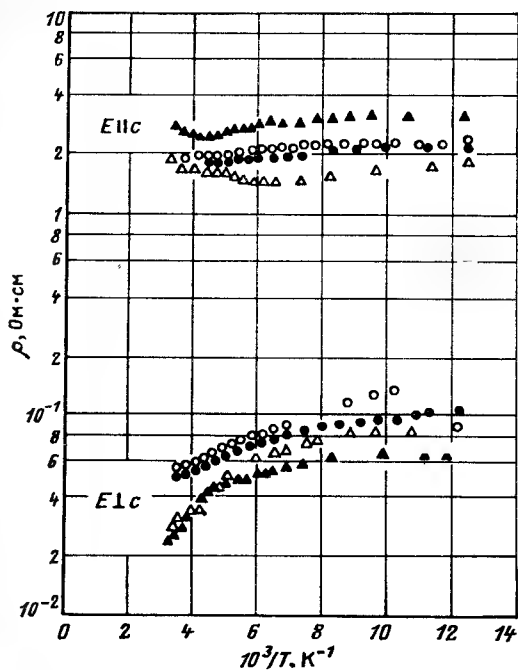


Рис. 22.168. Температурная зависимость удельного сопротивления кристаллов InS, выращенных из расплава [280]: концентрация электронов ( $T=300$  K),  $10^{18}$  см $^{-3}$ :  $\blacktriangle$  — 9;  $\triangle$  — 6,5;  $\circ$  — 5,5;  $\bullet$  — 4,5

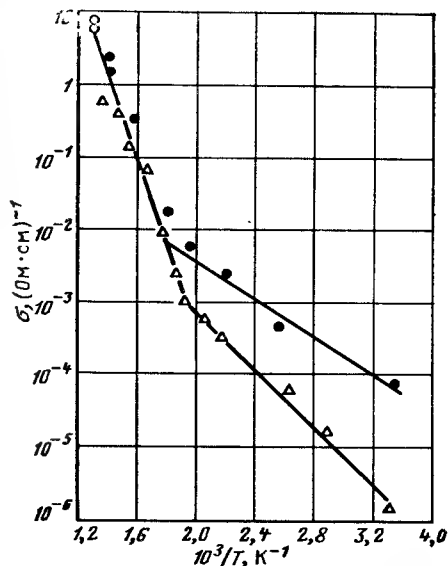


Рис. 22.169. Температурная зависимость проводимости различных кристаллов InSe вдоль ( $\triangle$ ) и поперек ( $\bullet$ ) оси  $c$  [281]

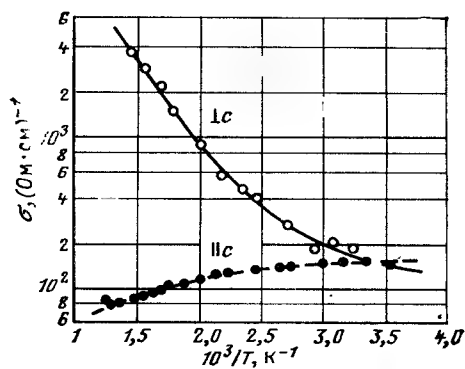


Рис. 22.170. Температурная зависимость проводимости InTe вдоль ( $\parallel c$ ,  $\circ$ ) и поперек ( $\perp c$ ,  $\bullet$ ) оси  $c$  [282]

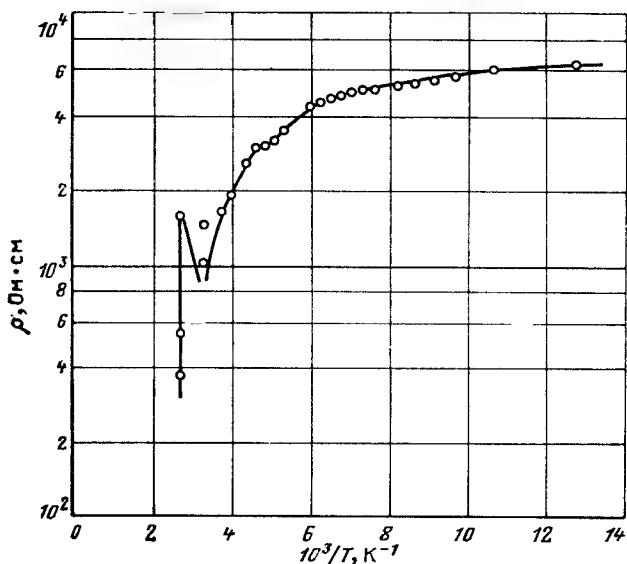


Рис. 22.171. Температурная зависимость удельного сопротивления различных кристаллов TIS (ток — вдоль оси) [283]

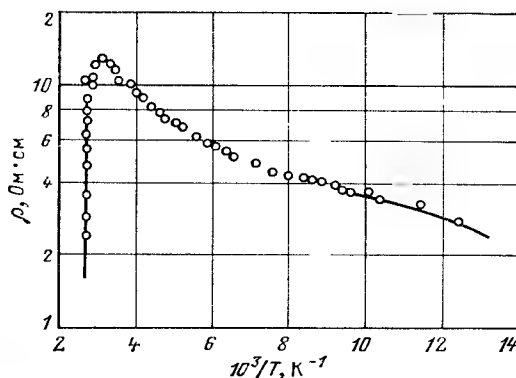


Рис. 22.172. Температурная зависимость удельного сопротивления ElSe (ток — вдоль оси) [283]

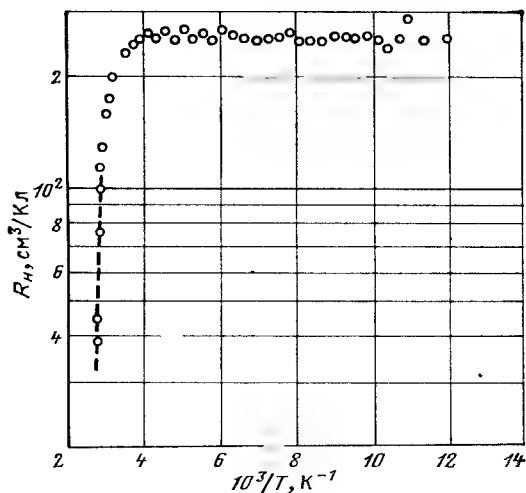


Рис. 22.173. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов TiSe в поле  $B=13$  кГс (ток — вдоль оси  $c$ , магнитное поле — поперек оси  $c$  в направлении  $[110]$ ) [283]

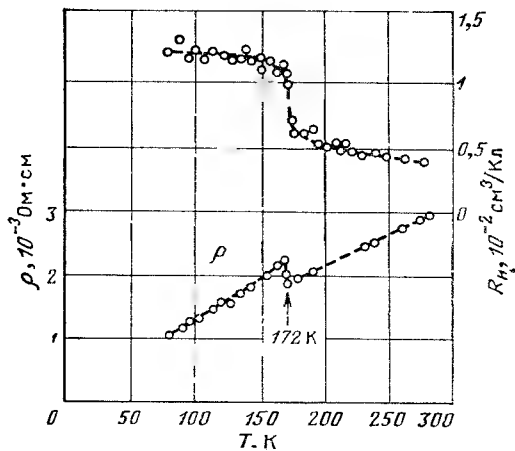


Рис. 22.174. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла для поликристаллического образца TiTe [284]. При  $T=172$  К происходит фазовый структурный переход от тетрагональной (при  $T>172$  К) структуры к орторомбической

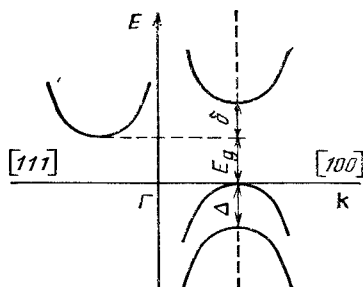


Рис. 22.175. Зонная структура TiCl, TiBr [294]:

| Соединение    | TiCl | TiBr |
|---------------|------|------|
| $\Delta$ , эВ | 1,7  | 1,04 |
| $\delta$ , эВ | 0,2  | 0,27 |

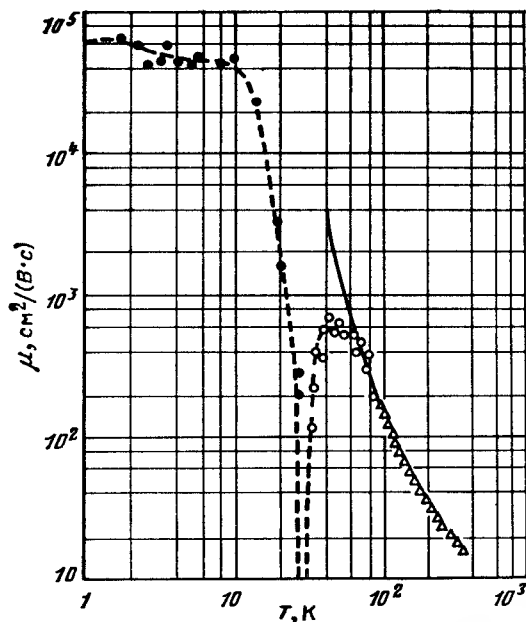


Рис. 22.176. Температурная зависимость холловской (●, ○) и дрейфовой (△) подвижности фотовозбужденных носителей в TiCl [285]  
● — дырки; ○, △ — электроны

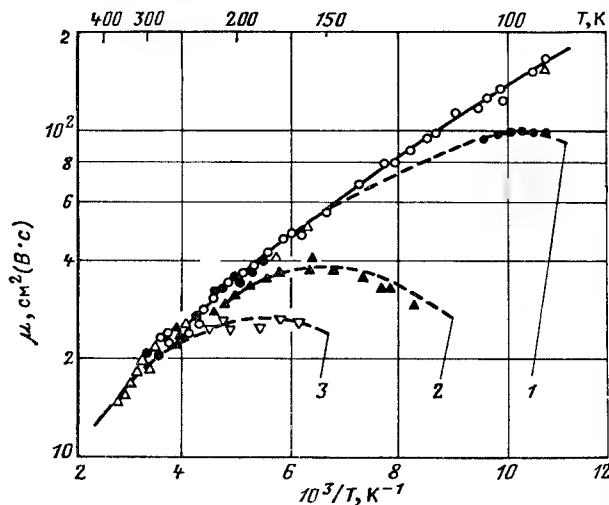


Рис. 22.177. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в кристаллах TiCl с различной концентрацией ловушек,  $\text{см}^{-3}$ :  
1 —  $8,4 \cdot 10^{14}$ ; 2 —  $1,2 \cdot 10^{16}$ ; 3 —  $3,3 \cdot 10^{16}$ , сплошная линия — чистый кристалл [286]

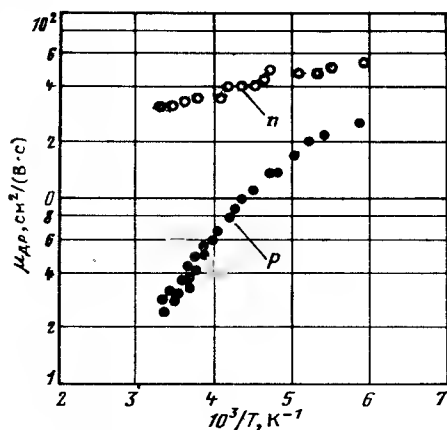


Рис 22.178. Температурные зависимости дрейфовых подвижностей электронов и дырок в TiBr [287]

## 22.3.4. Соединения типа $A^{IV}B^{IV}-A^{IV}B^{VI}$

Из полупроводниковых соединений типа  $A^{IV}B^{VI}$  известно  $Sn_3As_2$ , кристаллизующееся в ромбоэдрической решетке ( $T_{пл}=870$  К,  $E_g=0,47$  эВ,  $\mu_p=270$  см²/(В·с) [100]).

Наиболее изученными соединениями типа  $A^{IV}B^{VI}$  являются халькогениды свинца ( $PbS$ ,  $PbSe$ ,  $PbTe$ ), кристаллизующиеся в гранцентрированной кубической решетке  $O_h^5$ . Зонная структура — прямая, причем абсолютные экстремумы зон расположены на краю зоны Бриллюэна в направлении [111] (см. рис. 22.181). Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии представляют собой эллипсоиды вращения (их эквивалентное число равно 4 для каждой зоны). Валентная зона расщеплена на две подзоны; нижняя из них (подзона тяжелых дырок) имеет максимум внутри зоны Бриллюэна на осях [111] и проявляет себя в материалах  $p$ -типа при повышенных температурах (для  $PbTe$  при  $T \geq 400$  К). Халькогениды свинца обладают аномально высокой диэлектрической проницаемостью.

Некоторые соединения рассматриваемого типа характеризуются непрямой зонной структурой, как это имеет место, например, в  $SnS$ ,  $SnSe$  (см. рис. 22.216), или обладают сложной зонной структурой (см. рис. 22.211 для  $SnTe$ ). Тип проводимости рассматриваемых соединений часто определяется отклонением от стехиометрии.

Таблица 22.20. Электрофизические свойства  $SiC$

| Соединение    | Кристаллическая структура |                                    | $T_{пл}$ , К                                 | $\rho$ , г/см³ | $T_D$ , К  | $\hbar\omega_I$ , эВ | $\hbar\omega_{II}$ , эВ | $\epsilon_0$            |
|---------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
|               | Система, группа           | $a$ , с, нм                        |                                              |                |            |                      |                         |                         |
| $\alpha$ -SiC | Гекс., $C_{6v}^4$         | 0,308 ( $a$ ); 1,511 ( $c$ ) [292] | 3073 [132]                                   | 3,21 [193]     | 1200 [193] | 0,119 [194]          | 0,098 [194]             | 10,2 [124]<br>9,8 [194] |
| $\beta$ -SiC  | Куб., $T_d^2$             | 0,436 [1]                          | 2600 [124]<br>( $\beta \rightarrow \alpha$ ) | 3,21 [132]     | 1430 [288] | 0,103 [292]          | 0,094 [292]             | 9,7 [288]               |

Продолжение табл. 22.20

| Соединение    | $\epsilon_\infty$       | $E_g$ , эВ      | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ , $10^{-4}$ эВ/К | $m_n/m_0$                                        | $m_p/m_0$              | $\mu_n$ , см²/(В·с) | $\mu_p$ , см²/(В·с) |
|---------------|-------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| $\alpha$ -SiC | 6,9 [124]<br>6,73 [194] | 2,86 [292]      | -3,8 [85]                                          | 0,25 ( $\perp c$ ); 1,5 ( $\parallel c$ ) [292]  | 1,0 [123]<br>1,2 [124] | 230 [34]            | 70 [16]             |
| $\beta$ -SiC  | 6,5 [288]               | 2,4 (2 К) [292] | -5,8 [15,79]                                       | 0,24 ( $\perp c$ ); 0,65 ( $\parallel c$ ) [292] | 0,59 [15]              | 1000 [288]          | —                   |

Таблица 22.21. Электрофизические свойства  $TiO_2$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $TiO$

| Соединение      | Кристаллическая структура |                              | $T_{пл}$ , К | $\rho$ , г/см³  | $\epsilon_0$                                                                            | $\epsilon_\infty$                                        | $T_D$ , К |
|-----------------|---------------------------|------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------|
|                 | Система, группа           | $a$ , с, нм                  |              |                 |                                                                                         |                                                          |           |
| $TiO_2$ (рутил) | Тетр., $D_{4h}^{14}$      | 0,454 ( $a$ ); 0,296 ( $c$ ) | 2113         | 4,28 [209]      | 140 ( $\perp c$ )<br>260 ( $\parallel c$ )<br>89 ( $\perp c$ )<br>173 ( $\parallel c$ ) | 7 [211]<br>9 ( $\perp c$ ) [25]<br>6,8 ( $\parallel c$ ) | 670 [242] |
| $Ti_2O_3$       | Триг., $D_{3d}^6$         | 0,516 ( $a$ ); 1,357 ( $c$ ) | 2400         | 4,93—5,13 [288] | —                                                                                       | —                                                        | —         |
| $TiO$           | Куб., $O_h^5$             | 0,4177                       | 2010         | 5,82 [288]      | —                                                                                       | —                                                        | —         |

| Соединение                     | $E_g$ , эВ |  | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В · с)                |  |
|--------------------------------|------------|--|---------------------------------------------------|--|
| TiO <sub>2</sub> (рутил)       | 3,0 [16]   |  | 0,16 ( $\perp c$ ) [25]<br>0,57 ( $\parallel c$ ) |  |
| Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,02 [288] |  | $\sim 1000$ (4,2 К) [288]                         |  |
| TiO                            | 0,1 [288]  |  | $\sim 1$ [288]                                    |  |

Таблица 22.22. Электрофизические свойства окиси и халькогенидов свинца [125, 294]

| Соединение | Кристаллическая структура |                              | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $E_g$ , эВ                             | $\delta_n$ , эВ | $\delta_p$ , эВ | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ , 10 <sup>-4</sup> эВ/К | $\frac{\partial E_g}{\partial P}$ , 10 <sup>-11</sup> эВ/Па (10 <sup>-6</sup> эВ/ат) | $\frac{m_{n\parallel}}{m_0}$ | $\frac{m_n}{m_0}$ | $\frac{m_{p\parallel}}{m_0}$ | $\frac{m_{\perp}}{m_0}$ |
|------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------|
|            | Система, группа           | $a, c$ , нм                  |                            |              |                                        |                 |                 |                                                           |                                                                                      |                              |                   |                              |                         |
| PbO        | Тетр., $D_{4h}^7$         | 0,397 ( $a$ ); 0,502 ( $c$ ) | 9,53                       | 1163         | 2,07<br>2,03 (4,2 К)                   | —               | —               | 1                                                         | —                                                                                    | —                            | —                 | —                            | —                       |
| PbS        | Куб., $O_h^5$             | 0,594                        | 7,6                        | 1387         | 0,41<br>0,31 (77 К)<br>0,29 (4,2 К)    | 1,46            | 1,67            | 4; 5,2                                                    | —8; —9,1                                                                             | 0,105                        | 0,080             | 0,105                        | 0,075                   |
| PbSe       | То же                     | 0,612                        | 8,3                        | 1355         | 0,278<br>0,176 (77 К)<br>0,145 (4,2 К) | 1,36            | 1,72            | 4; 5,1                                                    | —8; —8,6                                                                             | 0,070                        | 0,040             | 0,068                        | 0,034                   |
| PbTe       | » »                       | 0,650                        | 8,2                        | 1190         | 0,32<br>0,22 (77 К)<br>0,19 (4,2 К)    | 1,11            | 0,77            | 4,5                                                       | —7,5; —8                                                                             | 0,22                         | 0,024             | 0,24                         | 0,025                   |

Продолжение табл. 22.22

| Соединение | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В · с)       | $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /(В · с)      | $n_i$ (300 К), 10 <sup>16</sup> см <sup>-3</sup> | $\epsilon_0$                       | $\epsilon_{\infty}$ | $\hbar\omega_L$ , МэВ | $\hbar\omega_T$ , МэВ | $T_D$ (200 К), К | $g_n^*$                                | $g_p^*$                                |
|------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| PbS        | 610<br>11 000 (77 К)<br>68 500 (4,2 К)   | 620<br>15 000 (77 К)<br>80 000 (4,2 К)  | 2,0                                              | 175                                | 17                  | 26,3                  | 8,2                   | 227              | 12                                     | 13                                     |
| PbSe       | 1000<br>15 500 (77 К)<br>139 000 (4,2 К) | 1000<br>13 700 (77 К)<br>57 900 (4,2 К) | 3,0                                              | 250                                | 24                  | 16,5                  | 5,4                   | 138              | 27 ( $\parallel$ )<br>19,6 ( $\perp$ ) | 32 ( $\parallel$ )<br>17,1 ( $\perp$ ) |
| PbTe       | 1730<br>31 600 (77 К)<br>800 000 (4,2 К) | 840<br>21 600 (77 К)<br>250 000 (4,2 К) | 1,5                                              | 400<br>1000 (77 К)<br>3000 (4,2 К) | 33                  | 13,6                  | 3,9                   | 125              | 60 ( $\parallel$ )<br>16 ( $\perp$ )   | 58 ( $\parallel$ )<br>19 ( $\perp$ )   |

\*  $\parallel$  ( $\perp$ ) — магнитное поле параллельно (перпендикулярно) большой оси эллипсоида энергий.Таблица 22.23. Полупроводниковые соединения  $A^{IV}B^{VI}$ 

| Соединение                      | Кристаллическая структура |                                                 | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К             | $T_D$ , К        | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ , 10 <sup>-4</sup> эВ/К [294] |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                                 | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                                  |                            |                          |                  |                                                                 |
| Si <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> | Гекс., $C_{3v}^4$         | 0,743 ( $a$ ); 1,347 ( $c$ ) [288]              | 4,5 [288]                  | 1165 [288]               | —                | —                                                               |
| GeS                             | Орторомб., $D_{2h}^{16}$  | 1,044 ( $a$ ); 0,365 ( $b$ ); 0,430 ( $c$ ) [1] | 4,01 [114]                 | 895 [35]<br>938 [294]    | —                | —(6 ÷ 8)                                                        |
| GeSe                            | То же                     | 1,079 ( $a$ ); 0,382 ( $b$ ); 0,438 ( $c$ ) [1] | 5,52 [114]                 | 943 [114]                | —                | —5                                                              |
| GeTe                            | Куб., $O_h^5$             | 0,602 [114]                                     | 6,19 [114]                 | 993 [114]                | 166 (<1 К) [164] | —4                                                              |
| SnS                             | Орторомб., $D_{2h}^{16}$  | 1,118 ( $a$ ); 0,398 ( $b$ ); 0,433 ( $c$ ) [1] | 5,08 [114]                 | 1155 [216]               | 270 (80 К) [114] | —                                                               |
| SnSe                            | То же                     | 1,157 ( $a$ ); 0,419 ( $b$ ); 0,446 ( $c$ ) [1] | 6,18 [114]                 | 1133 [216]               | 210 (80 К) [114] | —                                                               |
| SnTe                            | Куб., $O_h^5$             | 0,628 [1]<br>0,632 [294]                        | 6,45 [114]                 | 1079 [114]               | 140 [114]        | —                                                               |
| SnO <sub>2</sub>                | Тетр., $D_{4h}^{14}$      | 0,472 ( $a$ ); 0,317 ( $c$ ) [1]                | 6,95 [216]                 | 1400 [216]               | 570 [294]        | 12                                                              |
| SnS <sub>2</sub>                | Триг., $D_{3d}^3$         | 0,364 ( $a$ ); 0,587 ( $c$ ) [1]                | 4,5 [216]                  | 1038 [294]<br>1143 [288] | —                | —8,6                                                            |
| SnSe <sub>2</sub>               | То же                     | 0,381 ( $a$ ); 0,614 ( $c$ ) [288]              | 6,01 [294]                 | 923 [216]                | —                | —                                                               |

| Соединение                      | $E_g$ , эВ                 | $m_n/m_0$<br>[294]                                                  | $m_p/m_0$                                                                                                            | $\mu_n$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В·с) [294] | $\mu_p$ ,<br>см <sup>2</sup> /(В·с)                                                                        | $\epsilon_0^*$ [294] | $\epsilon_\infty^*$ [294] |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Si <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> | 1,89 [294]                 | 5,4 (   c)                                                          | 5,4 (   c) [294]                                                                                                     | —                                         | $2 \cdot 10^{-8}$ (   c) [294]                                                                             | —                    | —                         |
| GeS                             | 1,65<br>1,74 (4,2 K) [294] | —                                                                   | 0,3—0,7 [294]                                                                                                        | —                                         | 90 [294]                                                                                                   | 25—30                | 10—15                     |
| GeSe                            | 1,0 [8]<br>1,16 [114]      | —                                                                   | —                                                                                                                    | —                                         | 70 ( $\propto T^{-2}$ ) [114]<br>60 [8]<br>150 [126]                                                       | 22—30                | 14—22                     |
| GeTe                            | 0,1—0,2 [294]              | —                                                                   | 1,15 ( $m_{p1}$ ) [114]<br>5,0 ( $m_{p2}$ )<br>0,95 ( $m_{dp}$ ) [127]<br>0,2 ( $m_\perp$ )<br>1,0 ( $m_\parallel$ ) | —                                         | 90 ( $\perp c$ ) [127]<br>$\mu_{  a} \approx \mu_{  b}$<br>$\mu_{  a}/\mu_{  c} \approx 5,5$<br>1000 [288] | 40 [288]             | 36                        |
| SnS                             | 1,07 [3]                   | 0,45( $m_{dn}$ )                                                    | 0,15 ( $m_{dp}$ ) [15]<br>0,07 [288]<br>0,13 ( $m_{p1}$ )<br>0,09 ( $m_{p2}$ ) [294]<br>3 ( $m_{dp1}$ )              | —                                         | 1700 ( $\mu_1$ ) [181]<br>50 ( $\mu_2$ ) [114]<br>3500 (100 K) [114]<br>300 [69]                           | 32—48                | 14—16                     |
| SnSe                            | 0,9—0,95 [288]             | —                                                                   | —                                                                                                                    | —                                         | —                                                                                                          | 42—62                | 13—17                     |
| SnTe                            | 0,19 [294]<br>0,26 [114]   | —                                                                   | —                                                                                                                    | —                                         | —                                                                                                          | 1770<br>1200         | —                         |
| SnO <sub>2</sub>                | 3,54 [288]<br>3,97 [98]    | 0,30( $m_\perp$ )<br>0,23 ( $m_\parallel$ )<br>0,22( $m_{dn}$ )[69] | —                                                                                                                    | 260<br>8800 (77 K)                        | —                                                                                                          | 9,6—13,5             | 3,8—4,2                   |
| SnS <sub>2</sub>                | 2,07 [183]                 | —                                                                   | —                                                                                                                    | 50                                        | —                                                                                                          | 6—20                 | 5,6—8,8                   |
| SnSe <sub>2</sub>               | 0,97 [183]                 | 0,4<br>2,9( $m_{dn}$ )                                              | —                                                                                                                    | 27 [183]<br>66 (77 K)                     | —                                                                                                          | 10—21                | 9,4—10,7                  |

\* Значения  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_\infty$  зависят от взаимной ориентации E и оси c.

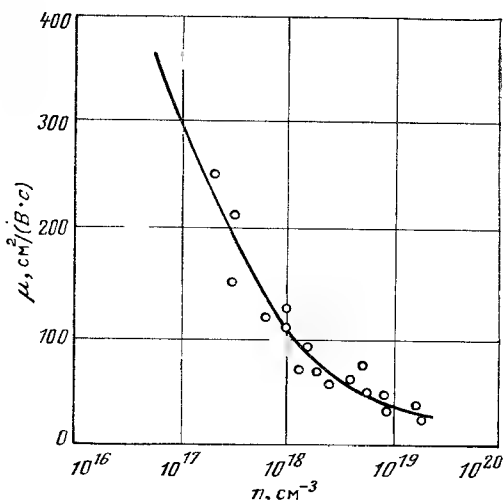


Рис. 22.179. Зависимость дрейфовой подвижности электронов в α-SiC при  $T=300$  K от концентрации электронов [295]

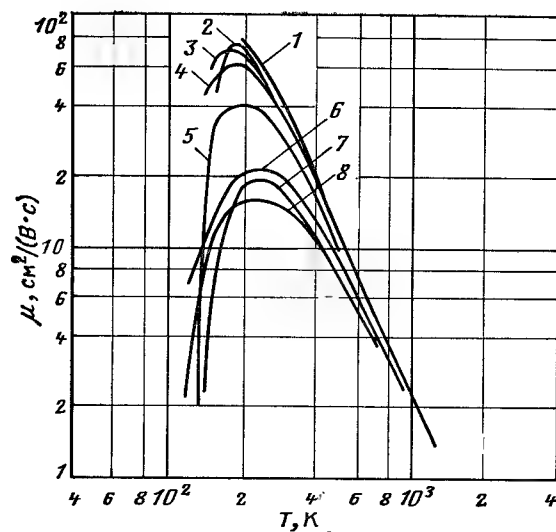


Рис. 22.180. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в кристаллах α-SiC [296]:

| $N_0$<br>п.п. | $N_A \cdot 10^{17}$ см <sup>-3</sup> | $N_D \cdot 10^{17}$ см <sup>-3</sup> | Примечание                |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1             | 3,2                                  | 1,1                                  | Атмосфера Ar              |
| 2             | 3,7                                  | 1,9                                  | То же                     |
| 3             | 36                                   | 9                                    | Добавка Cl к атмосфере Ar |
| 4             | 23                                   | 7,6                                  | То же                     |
| 5             | 850                                  | 140                                  | » »                       |
| 6             | 340                                  | 230                                  | Добавка CO к атмосфере Ar |
| 7             | 3600                                 | 120                                  | Добавка Cl к атмосфере Ar |
| 8             | 320                                  | 190                                  | Атмосфера Ar              |

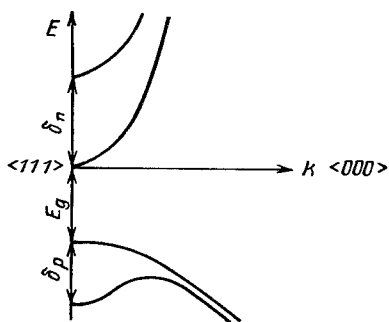


Рис. 22.181. Зонная структура PbS, PbSe, PbTe [125]  
(значения параметров см. в табл. 22.22)

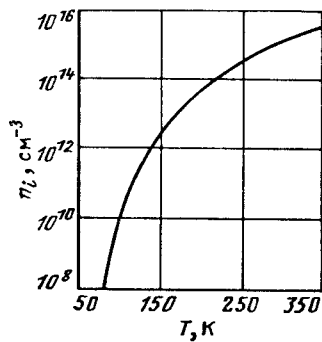


Рис. 22.183. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbS [297]

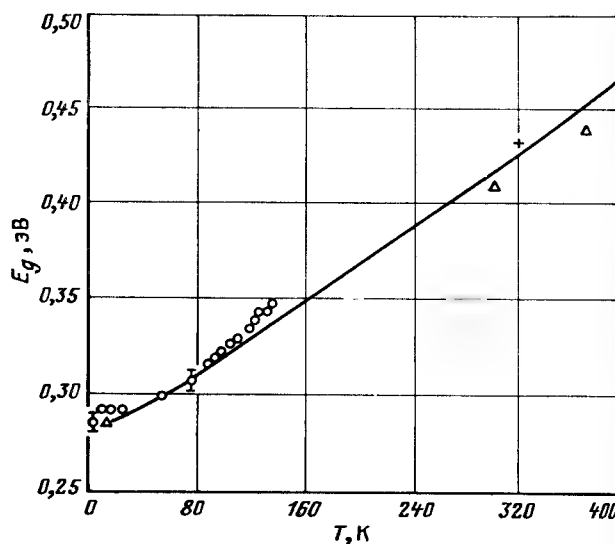


Рис. 22.182. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны PbS [297]

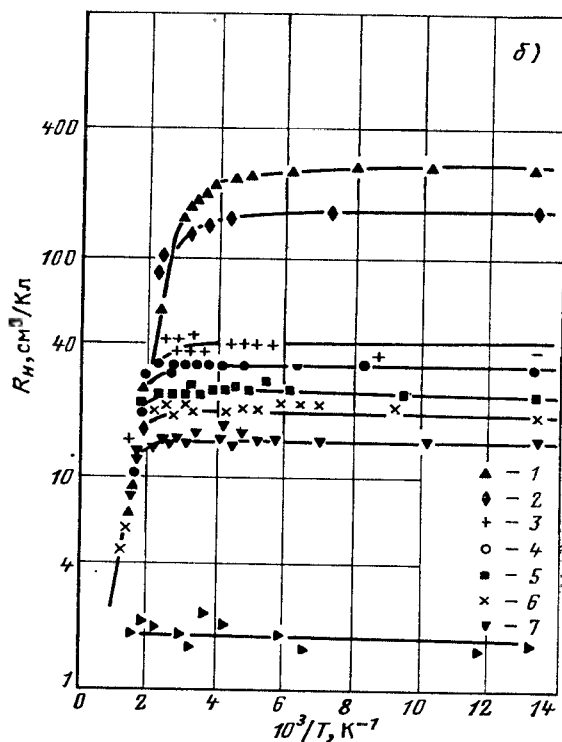
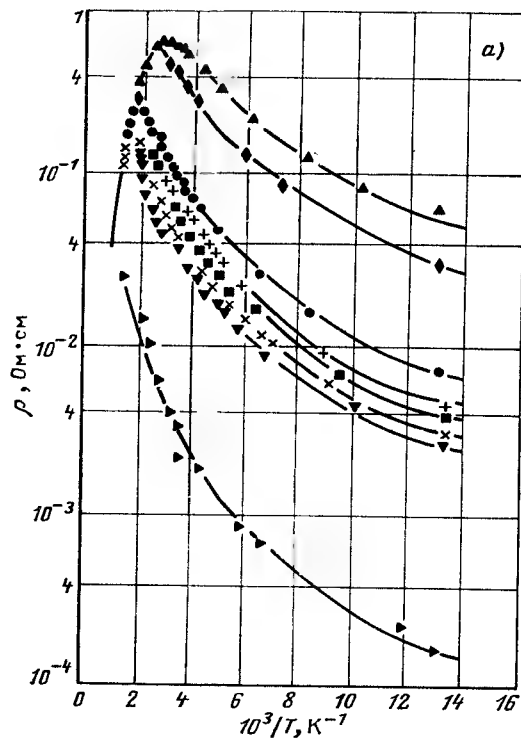


Рис. 22.184. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) кристаллов n-PbS [117]:  
концентрация носителей растет от 1 к 7

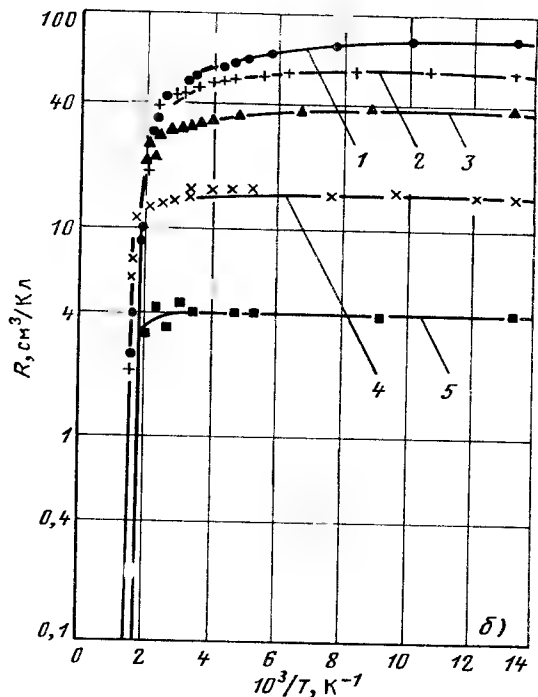
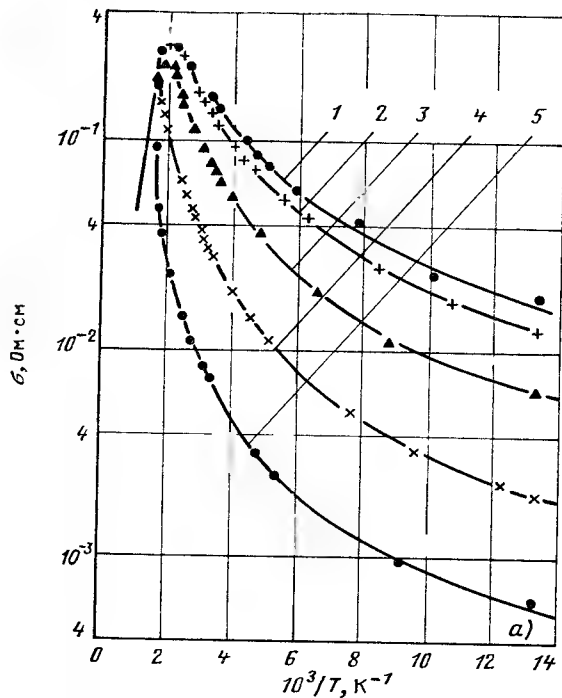


Рис. 22.185. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) кристаллов р-PbS [228]:  
концентрация растет от 1 к 5

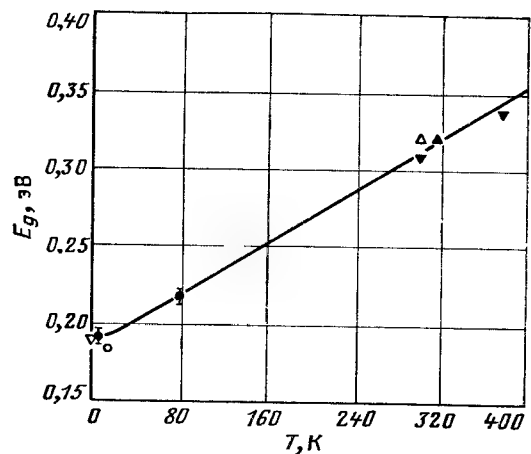
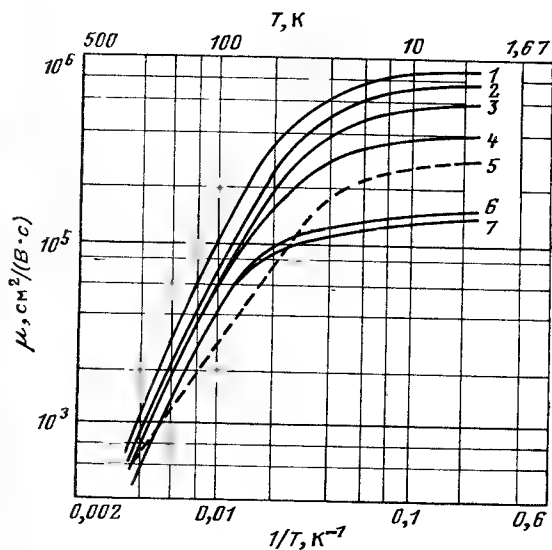


Рис. 22.187. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны PbSe [297]

Рис. 22.186. Температурные зависимости холловских подвижностей электронов и дырок в кристаллах PbS [117]:

концентрация носителей,  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ : 1 — 2,66 (р); 2 — 4,25 (n); 3 — 7,45 (n); 4 — 4,63 (n); 5 — 2,72 (n); 6 — 0,184 (n); 7 — 0,164 (n)



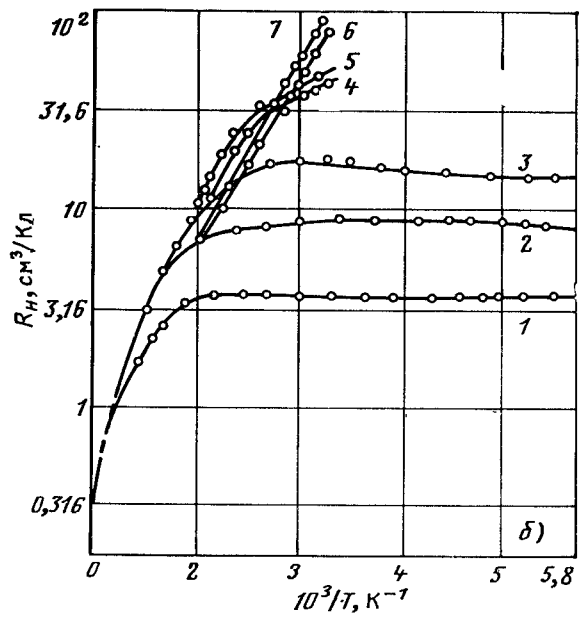
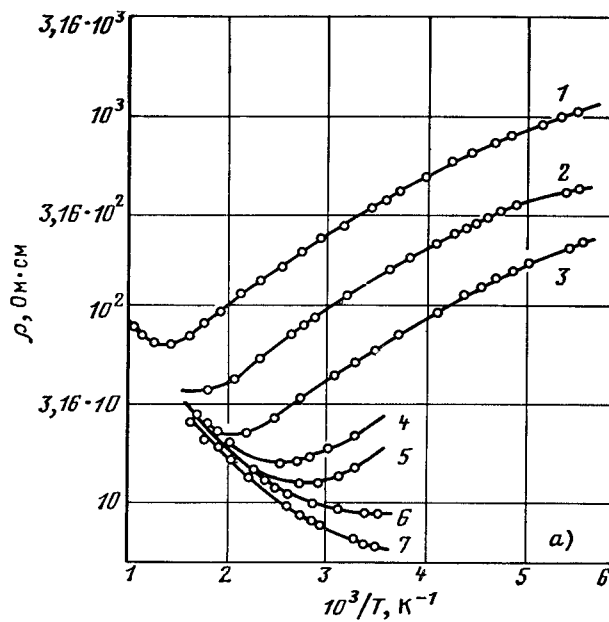


Рис. 22.189. Температурные зависимости проводимости (а) и коэффициента Холла (б) кристаллов  $n$ -PbSe с различной концентрацией доноров [117]:  
концентрация доноров,  $\text{см}^{-3}$ : 1 —  $1,6 \cdot 10^{18}$ ; 2 —  $7,8 \cdot 10^{17}$ ; 3 —  $3,5 \cdot 10^{17}$ ; 4 —  $1,58 \cdot 10^{17}$ ; 5 —  $1,26 \cdot 10^{17}$ ; 6 —  $4,9 \cdot 10^{16}$ ; 7 —  $3 \cdot 10^{16}$

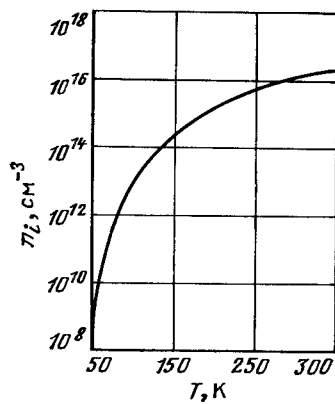


Рис. 22.188. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbSe [297]

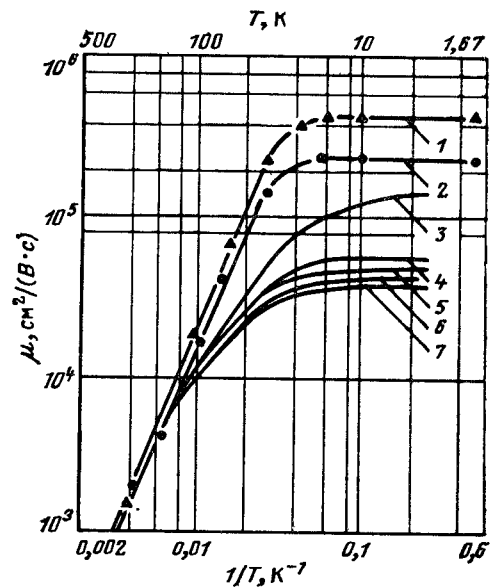


Рис. 22.190. Температурная зависимость холловской подвижности электронов и дырок в кристаллах PbSe [117]:  
концентрация носителей,  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ : 1 — 0,16 ( $n$ ); 2 — 0,11 ( $p$ ); 3 — 3,6 ( $n$ ); 4 — 4,3 ( $p$ ); 5 — 1,4 ( $p$ ); 6 — 3,5 ( $p$ ); 7 — 2,4 ( $n$ )

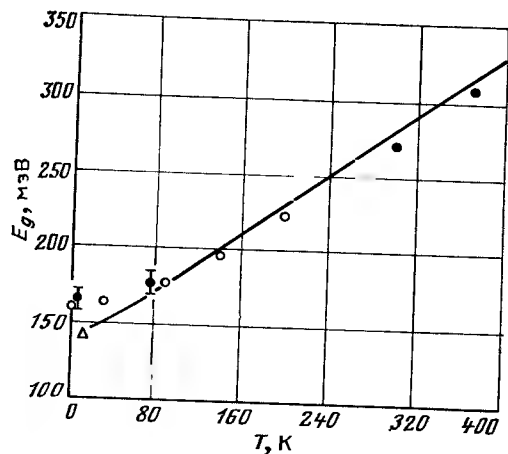


Рис. 22.191. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны PbTe [297]

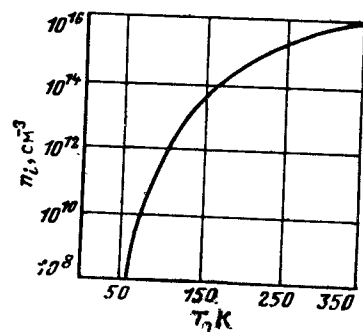


Рис. 22.192. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbTe [297]

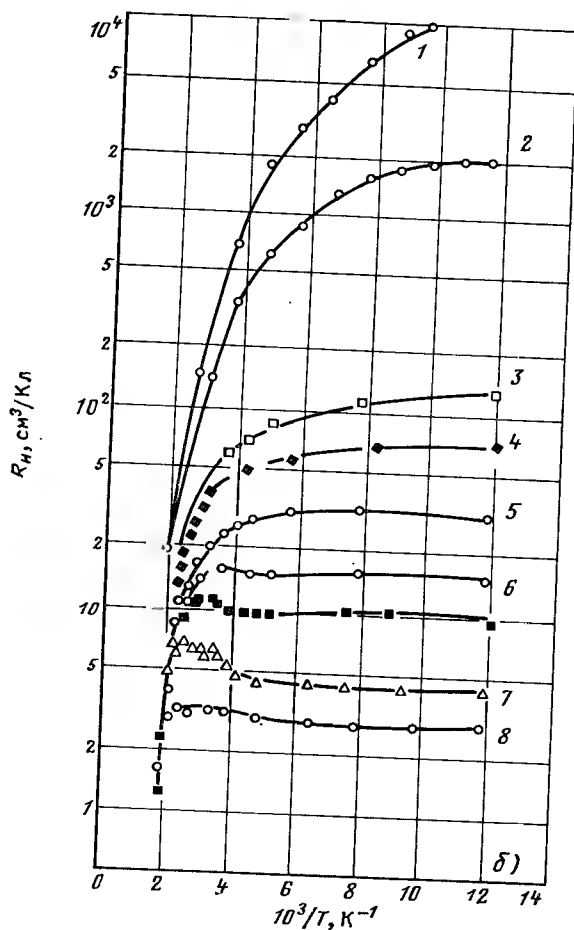
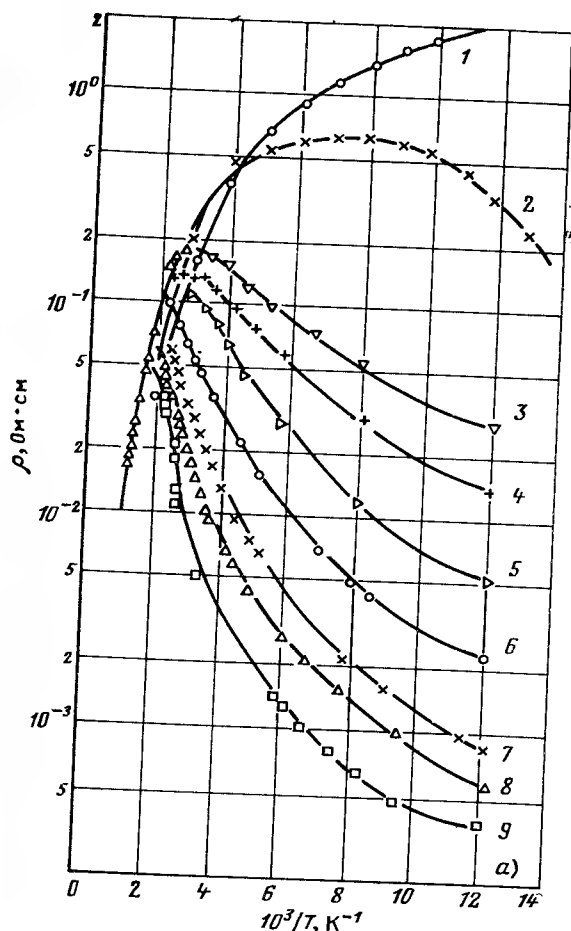


Рис. 22.193. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) различных кристаллов PbTe [117]:  
1, 2 — почти собственные образцы; 3—9 — p-PbTe; концентрация носителей растет от 1 к 9

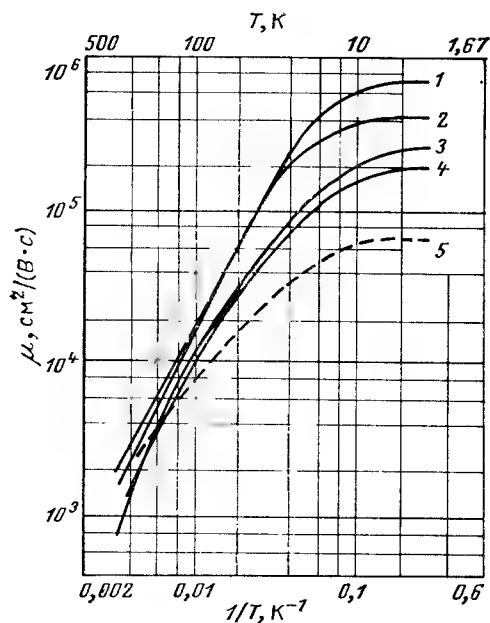


Рис. 22.194. Температурные зависимости холловских подвижностей электронов и дырок в кристаллах PbTe с различной концентрацией носителей,  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ : 1 — 1,0 (n); 2 — 0,58 (n); 3 — 2,1 (p); 4 — 3,0 (p); 5 — 9,5 (n) [117]

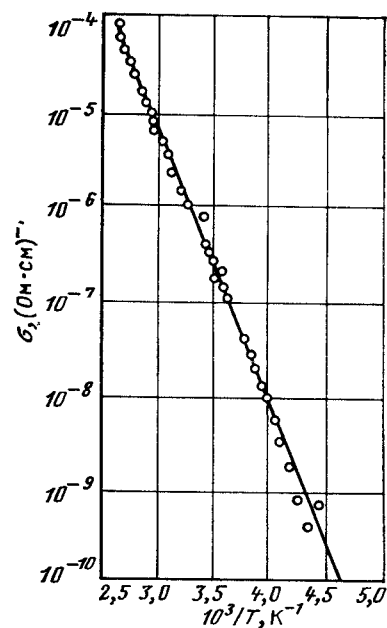


Рис. 22.196. Температурная зависимость проводимости иглообразных кристаллов p-GeS [298]

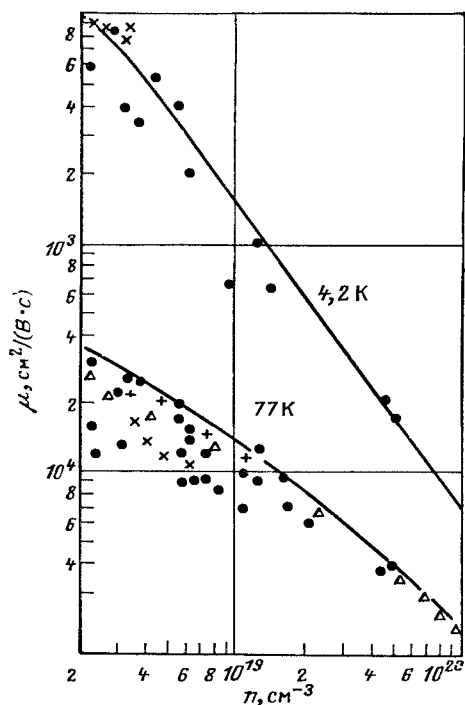


Рис. 22.195. Зависимости подвижности электронов в PbTe при  $T=77$  и  $4,2 \text{ K}$  от их концентрации [125]: точки — данные разных авторов

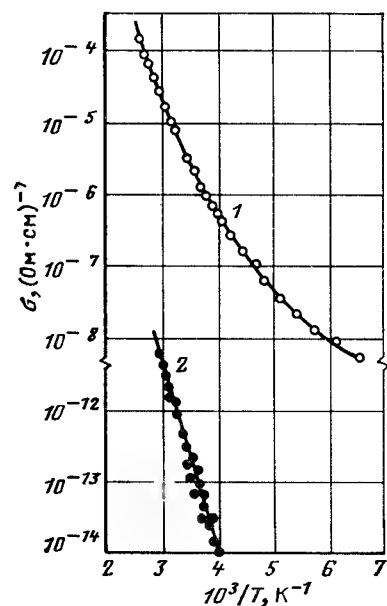


Рис. 22.197. Температурные зависимости проводимости кристаллического (1, поперек оси с) и аморфного (2) GeS [299]

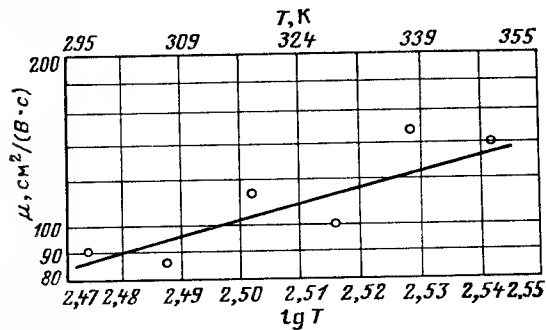


Рис. 22.198. Температурная зависимость подвижности дырок для пленки GeS толщиной 730 нм [300]

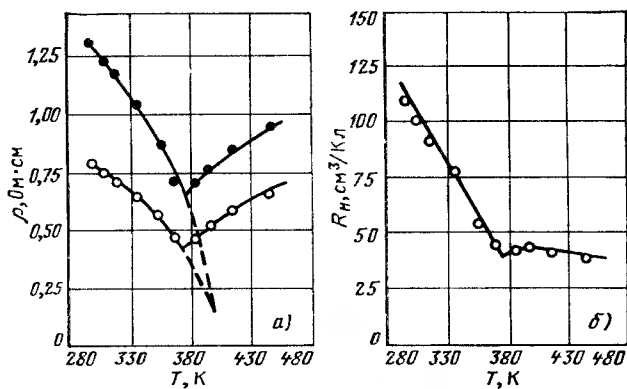


Рис. 22.200. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) вдоль осей  $a$  (●) и  $b$  (○) и коэффициента Холла (б) в плоскости (001) для GeSe [302]

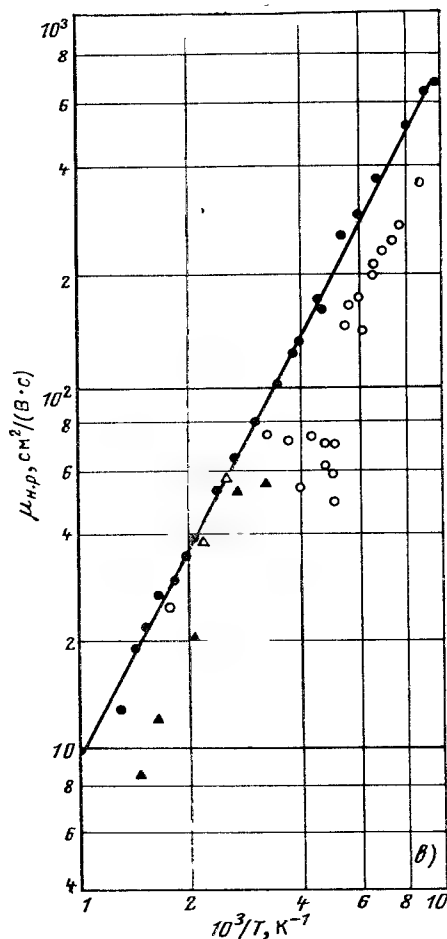
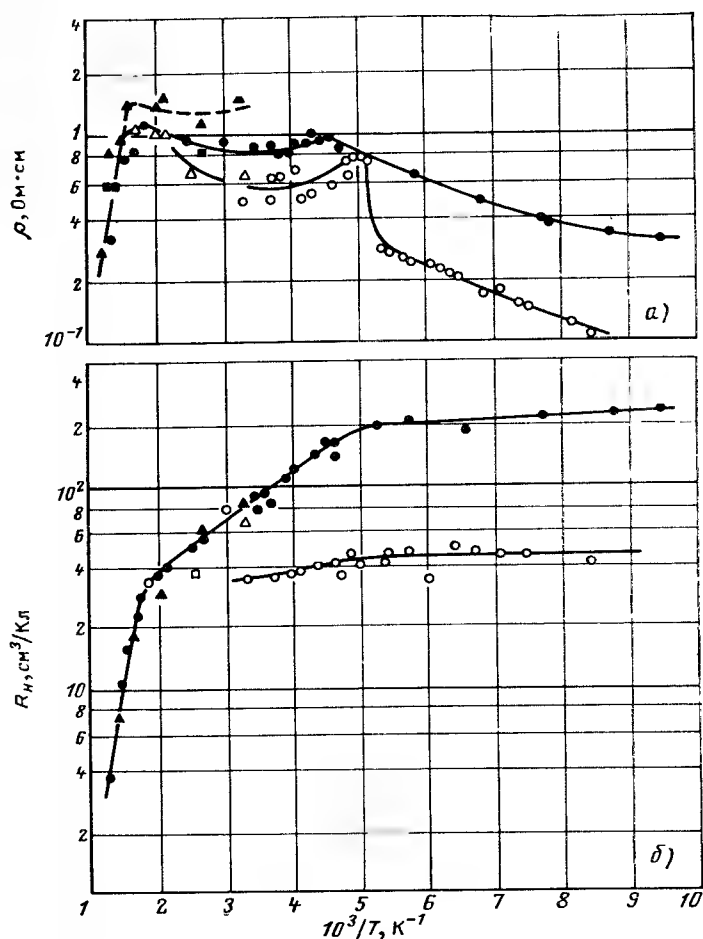


Рис. 22.199. Температурные зависимости удельного сопротивления (а), коэффициента Холла (б) и подвижности дырок (в) поперек оси  $c$  для различных кристаллов  $p$ -GeSe стехиометрического состава [301]

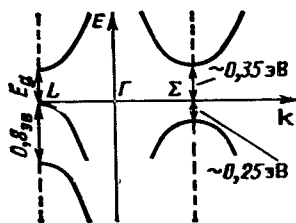


Рис. 22.201. Зонная структура GeTe [294]

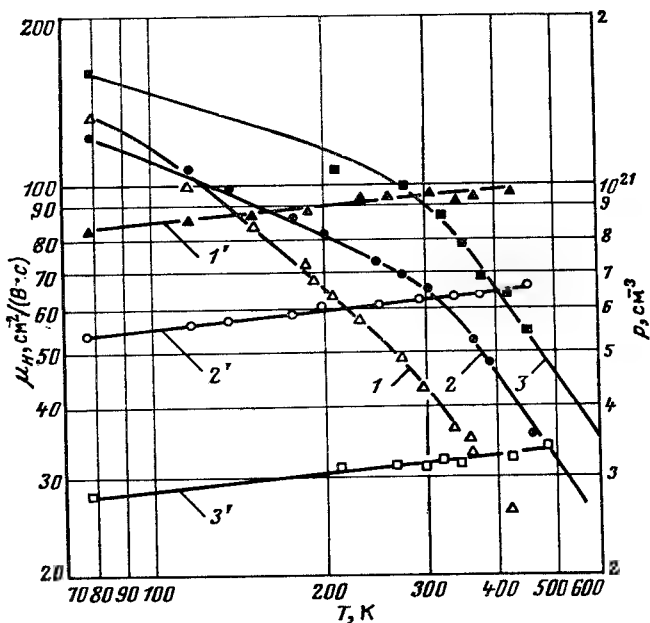


Рис. 22.203. Температурные зависимости холловской подвижности (2, 3) и концентрации дырок (2', 3') в поликристаллических образцах и монокристаллических пленках (1, 1') GeTe [304]: температура осаждения пленок на стеклянной подложке, °C: 2, 2' — 250; 3, 3' — 300

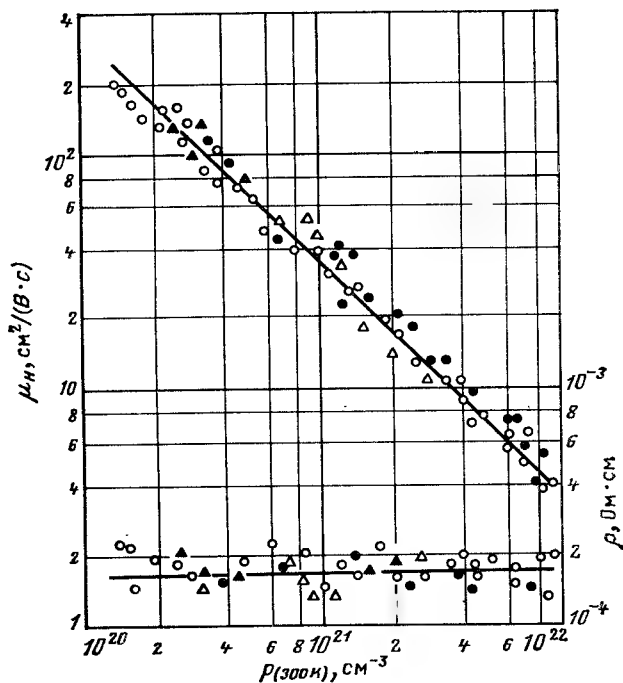


Рис. 22.202. Зависимости холловской подвижности дырок и удельного сопротивления от концентрации дырок в пленках GeTe с различным содержанием Te: ○ — 54% (неотожженный образец); остальные символы — 51,5% (после нескольких процессов отжига) [303]

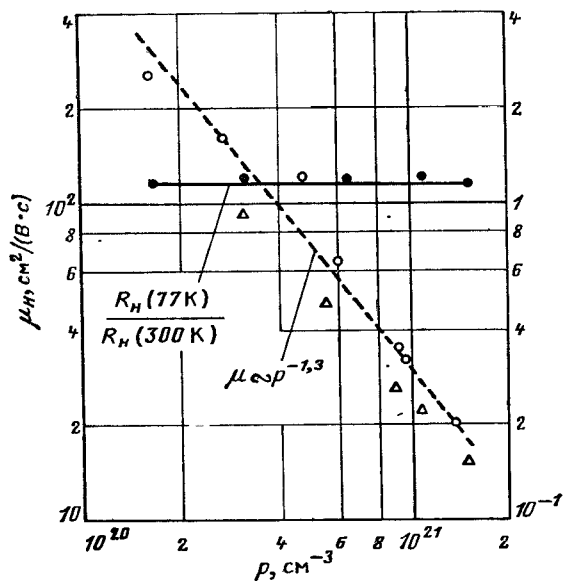


Рис. 22.204. Зависимости холловской подвижности дырок при температурах 77 (○) и 300 К (Δ) и отношения коэффициентов Холла для тех же температур от концентрации дырок в кристаллических пленках GeTe, полученных осаждением на подложках с различной температурой [304]. Значения  $R_H$  (300 К) для различных пленок различаются; для объемных поликристаллических образцов  $R_H$  (300 К) =  $6,5 \cdot 10^{-3}$  см³/Кл

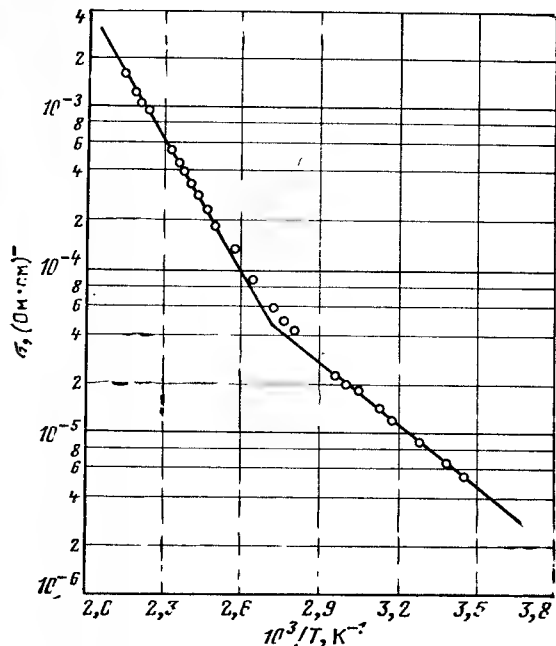


Рис. 22.205. Температурная зависимость проводимости монокристалла SnS [305]

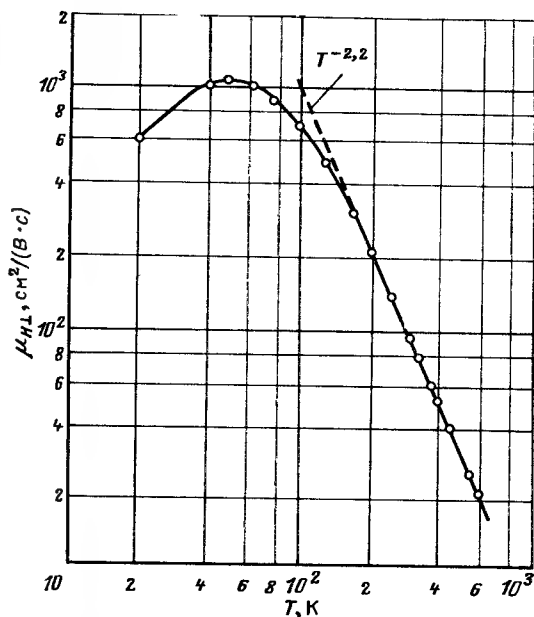


Рис. 22.206. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в SnS поперек оси *c* [306]

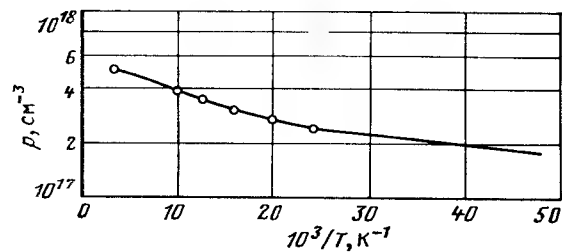


Рис. 22.207. Температурная зависимость концентрации дырок в SnS [306]

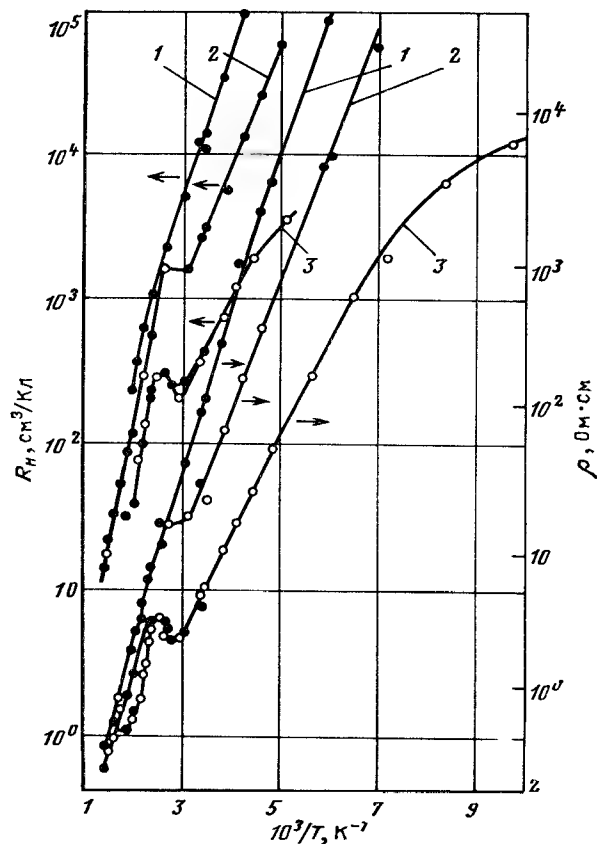


Рис. 22.208. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла в кристаллах *n*-SnSe после выращивания (1), отжига (2) и закалки (3) [307]

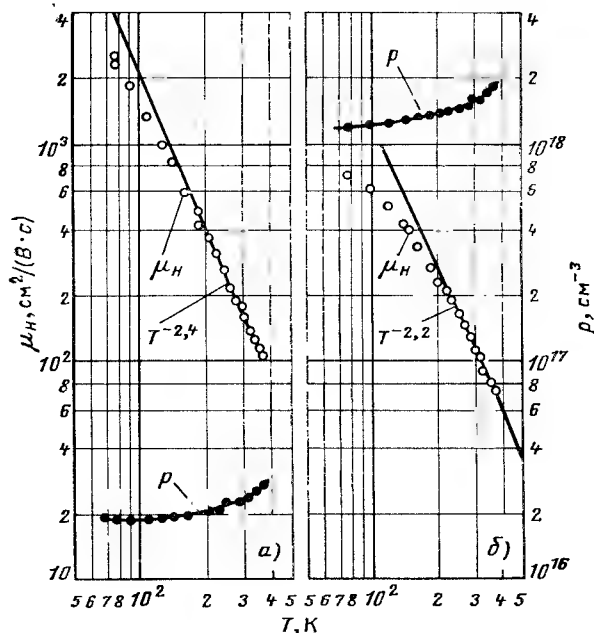


Рис. 22.209. Температурные зависимости подвижности дырок вдоль оси [001] и концентрации дырок в кристаллах SnSe с низкой (а) и высокой (б) концентрацией дырок [308]

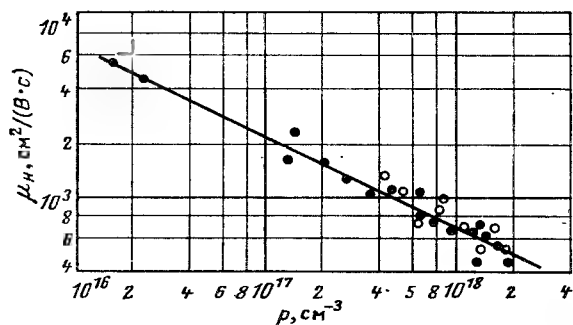


Рис. 22.210. Зависимость холловской подвижности дырок вдоль оси [001] при  $T=77$  К от их концентраций в SnSe после выращивания (○) и отжига (●) [308]

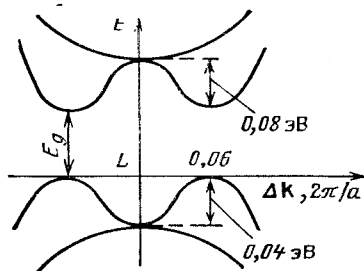


Рис. 22.211. Зонная структура SnTe вблизи точки  $L$  зоны Бриллюэна [294]

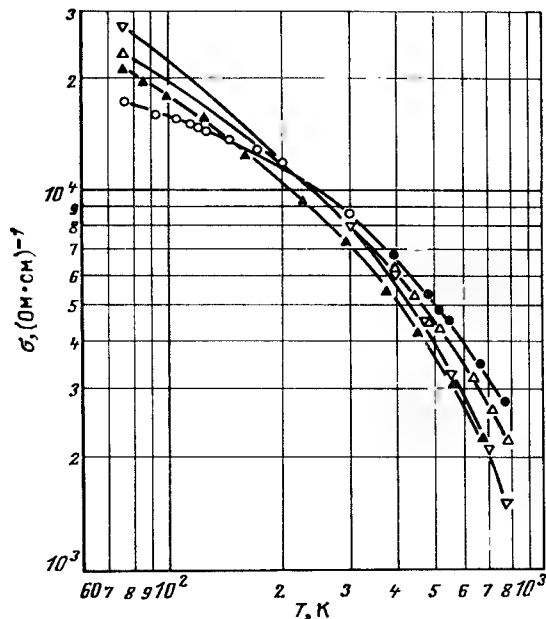


Рис. 22.212. Температурная зависимость проводимости различных кристаллов SnTe [309]: концентрация дырок при  $T=77$  К,  $10^{20}$  см $^{-3}$ :  $\nabla$  — 2,5;  $\blacktriangle$  — 3,48;  $\triangle$  — 8,05;  $\circ$  — 18,8;  $\bullet$  — 17,6

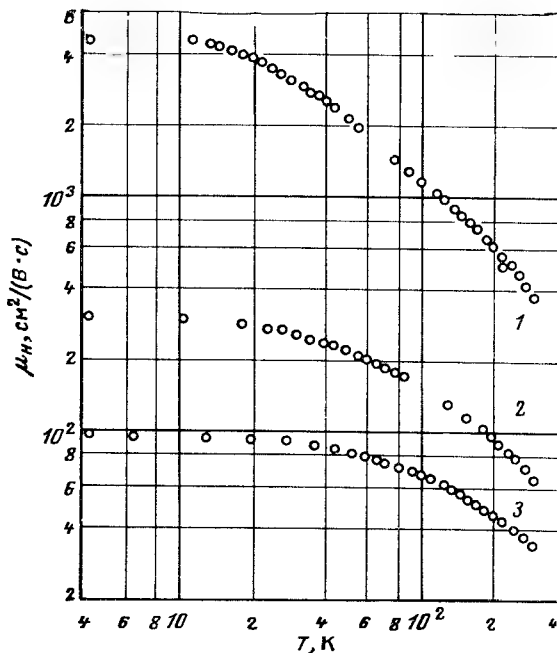


Рис. 22.213. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в различных кристаллах SnTe [310]: концентрация дырок при  $T=4.2$  К,  $10^{20}$  см $^{-3}$ : 1 — 1.4; 2 — 7.73; 3 — 1.74

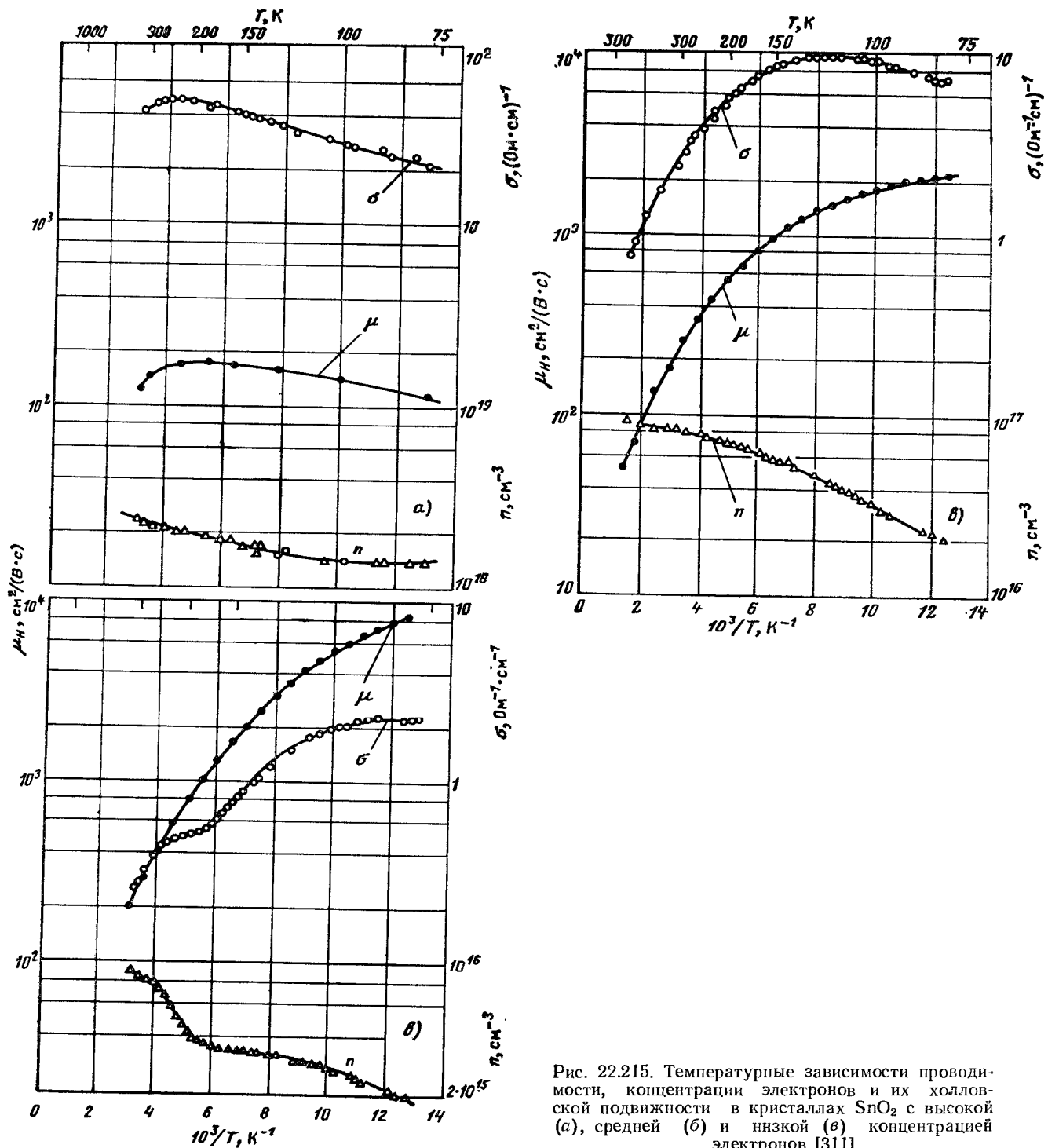


Рис. 22.215. Температурные зависимости проводимости, концентрации электронов и их холловской подвижности в кристаллах  $\text{SnO}_2$  с высокой (а), средней (б) и низкой (в) концентрацией электронов [311]



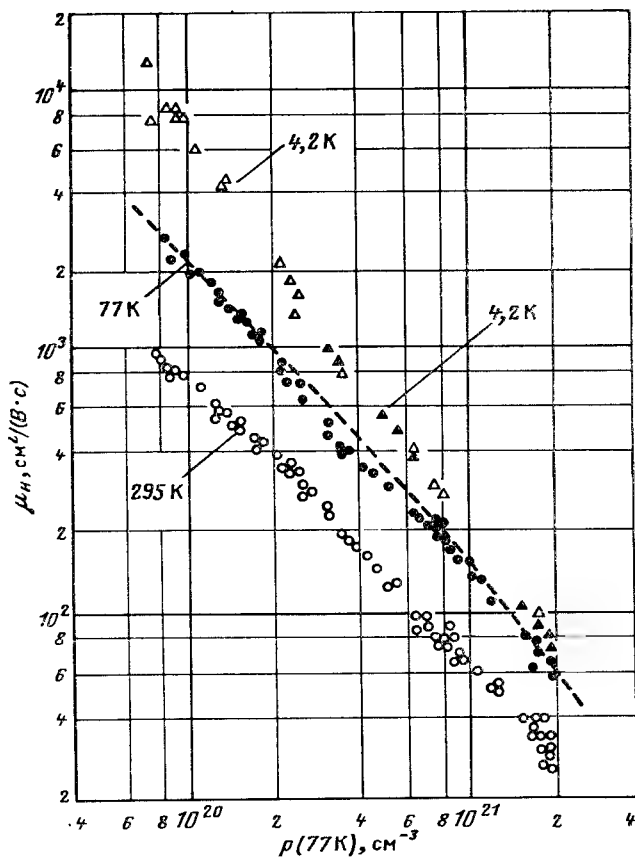


Рис. 22.214. Зависимость холловской подвижности дырок при различной температуре от их концентрации при  $T=77$  К для кристаллов SnTe [309, 310]

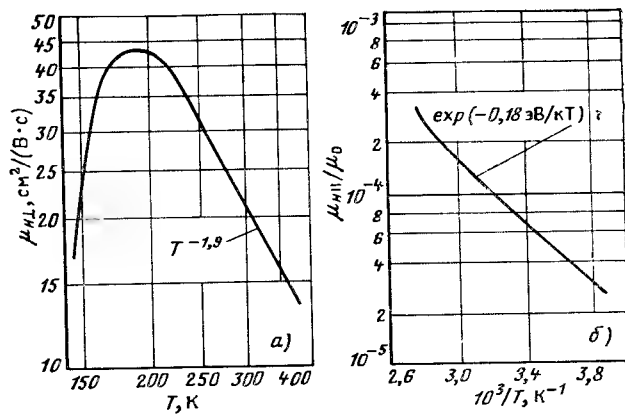


Рис. 22.217. Температурная зависимость холловской подвижности электронов поперек (а) и вдоль (б) оси  $c$  в SnS₂ [312]

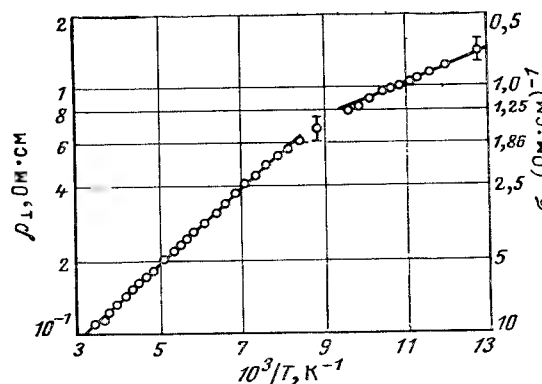


Рис. 22.218. Температурная зависимость удельного сопротивления (проводимости) поперек оси  $c$  для кристалла SnSe₂ с концентрацией электронов  $n=1,57 \cdot 10^{18}$  см⁻³ при  $T=290$  К [36]

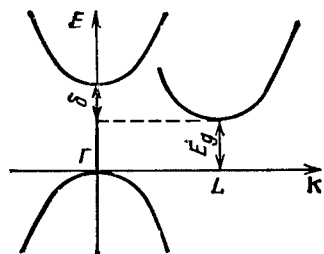


Рис. 22.216. Зонная структура SnS₂, SnSe₂ [294]:  
δ, эВ: SnS₂ — 0,8; SnSe₂ — 0,65

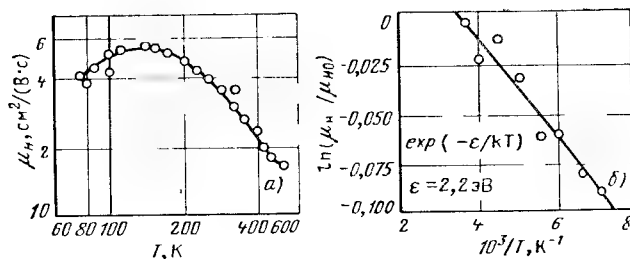


Рис. 22.219. Температурные зависимости подвижности электронов в базисной плоскости (а) и перпендикулярном ей направлении (б) в кристалле SnSe₂ [270]

### 22.3.5. Соединения типа $A^{\text{VI}}B^{\text{VI}}-A^{\text{VI}}B^{\text{VII}}$

Известно полупроводниковое соединение SbI типа  $A^{\text{VI}}B^{\text{VII}}$ , кристаллизующееся в гексагональной решетке ( $a=0,748$  нм,  $c=2,09$  нм,  $E_g=2,5$  эВ [242]).

Таблица 22.24. Электрофизические свойства сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  [293]

| Кристаллическая структура |                                                                                 | $T_D$ , К           | $E_g$ , эВ                                                                  | $m_n/m_0$                                                                                    | $\mu_n$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ | $\mu_p$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ | $\epsilon_0$ , (4,2 К)                           |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Система                   | $a, b, c$ , нм                                                                  |                     |                                                                             |                                                                                              |                                                 |                                                 |                                                  |
| Ромбоэдр.                 | 0,474—0,450<br>( $a, x = 0 \div 1$ );<br>1,186—1,154<br>( $c, x = 0 \div 0,5$ ) | 128,5 ( $x = 0,1$ ) | $6 \cdot 10^{-3}$<br>( $x = 0,06$ )<br>$8 \cdot 10^{-3}$<br>( $x = 0,068$ ) | 0,025<br>( $m_1, x = 0,05$ )<br>0,75<br>( $m_2, x = 0,05$ )<br>0,0065<br>( $m_3, x = 0,05$ ) | $3,97 \cdot 10^4$<br>( $x = 0,03$ )             | $4,73 \cdot 10^4$<br>( $x = 0,03$ )             | 360<br>( $x = 0,072$ )<br>175<br>( $x = 0,092$ ) |

Таблица 22.25. Полупроводниковые соединения  $A^V B^{\text{VI}}$ 

| Соединение               | Кристаллическая структура |                                                      | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{\text{пл}}$ , К      | $E_g$ , эВ                            | $\frac{\partial E_g}{\partial T}$ , $10^{-4}$ эВ/К | $m_n/m_0$                                                                                 |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|                          | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                                       |                            |                          |                                       |                                                    |                                                                                           |
| $\text{As}_2\text{S}_3$  | Моноклин., $C_{2h}^5$     | 1,147 ( $a$ ); 0,957 ( $b$ );<br>0,424 ( $c$ ) [1]   | 3,43 [123]                 | 598 [123]                | 2,5 [123]<br>2,6 [294]                | —5,6 [10]<br>—7 [294]                              | —                                                                                         |
| $\text{As}_2\text{Se}_3$ | То же                     | 1,205 ( $a$ ); 0,989 ( $b$ );<br>0,428 ( $c$ ) [288] | 4,75 [216]                 | 633 [216]                | 1,8 [114]<br>1,85 [294]               | —8 [288]                                           | —                                                                                         |
| $\text{As}_2\text{Te}_3$ | » »                       | 1,44 ( $a$ ); 0,992 ( $b$ );<br>0,405 ( $c$ ) [1]    | 6,1 [123]                  | 635 [116]                | 1,9 [107]<br>0,5 [288]                | —3 [288]                                           | 0,36 ( $m_{dn}$ ) [15]                                                                    |
| $\text{Sb}_2\text{S}_3$  | Орторомб., $D_{2h}^{16}$  | 1,12 ( $a$ ); 1,128 ( $b$ );<br>0,386 ( $c$ ) [1]    | 4,64 [123]                 | 819 [116]                | 1,62 [12]<br>1,72 [114]<br>1,88 [294] | —5,7 [114]<br>—9 [294]                             | —                                                                                         |
| $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ | То же                     | 1,158 ( $a$ ); 1,168 ( $b$ );<br>0,398 ( $c$ ) [1]   | 5,81 [123]                 | 885 [116]                | 1,1 [294]<br>1,2 [123]                | —5,5 [294]<br>—7 [114]                             | 2,2 [288]                                                                                 |
| $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ | Триг., $D_{3d}^5$         | 1,043 ( $a$ ); $\alpha = 23^\circ 23'$<br>[294]      | 6,5 [198]<br>6,57 [114]    | 895 [118]                | 0,19 [48]<br>0,22 [294]               | —1 [288]                                           | 0,37 ( $m_{dn}$ ) [15]                                                                    |
| $\text{Bi}_2\text{S}_3$  | Орторомб., $D_{2h}^{16}$  | 1,113 ( $a$ ); 1,127 ( $b$ );<br>0,397 ( $c$ ) [1]   | 6,73 [123]<br>6,81 [294]   | 1036 [294]<br>1123 [116] | 1,25 [16]<br>1,3 [116]                | —8 [288]                                           | —                                                                                         |
| $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ | Триг., $D_{3d}^5$         | 0,984 ( $a$ ); $\alpha = 24^\circ 24'$<br>[132]      | 7,40 [114]<br>7,68 [294]   | 979 [116]                | 0,16 [294]<br>0,2 [288]               | —2 [168]                                           | 0,02 ( $m_{\perp}$ )<br>0,13 ( $m_{\parallel}$ ) [294]<br>0,15 ( $m_{dn}$ )<br>0,27 [294] |
| $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ | То же                     | 1,048 ( $a$ ); $\alpha = 24^\circ 9'$<br>[117]       | 7,86 [117]                 | 853 [116]                | 0,13 [117]<br>0,16 [45]               | —0,95 [117]<br>—1,5 [294]                          | 0,32 ( $m_{dn}$ ) [123]                                                                   |
| $\text{BiSe}$            | Гекс., $D_{3d}^1$         | 0,418 ( $a$ ); 2,28 ( $c$ )<br>[288]                 | 8,4 [288]                  | 880 [123]                | 0,4 [123]                             | —                                                  | —                                                                                         |

Продолжение табл. 22.25

| Соединение               | $m_p/m_0$                             | $\mu_n$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ | $\mu_p$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ | $\epsilon_{\infty}$ [294]                    | $\epsilon_0$ [294]                          | $T_D$ , К              |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|
| $\text{As}_2\text{S}_3$  | —                                     | $\sim 1$ [294]                                  | —                                               | 5,7—8,8<br>7,5 [184]                         | 5,9—12<br>9,7 [184]                         | 590 [288]              |
| $\text{As}_2\text{Se}_3$ | —                                     | 20—80 [294]                                     | $\sim 10$ [288]                                 | 8,8—10,5<br>6,0 [184]                        | 12,4—13,9<br>8,9 [184]                      | 418 [288]              |
| $\text{As}_2\text{Te}_3$ | 0,5 ( $m_{dp}$ ) [15]                 | 170 [15]                                        | 80 [15]                                         | —                                            | —                                           | 260 [288]              |
| $\text{Sb}_2\text{S}_3$  | —                                     | 15 [115]                                        | 45 [115]                                        | 7,2 ( $\perp c$ )<br>9,5 ( $\parallel c$ )   | 180 ( $\parallel c$ )<br>15 ( $\perp c$ )   | 310 [132]              |
| $\text{Sb}_2\text{Se}_3$ | 1,4 [288]                             | 75 [16]                                         | 45 [16]                                         | 13,7 ( $\perp c$ )<br>15,1 ( $\parallel c$ ) | 120 ( $\parallel c$ )                       | 240 [132]              |
| $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ | 0,3 [294]<br>0,34 ( $m_{dp}$ ) [15]   | —                                               | 400 [44]<br>10 000 (4,2 К) [294]                | 32,5 ( $\perp c$ )<br>51 ( $\parallel c$ )   | 168 ( $\perp c$ )<br>36,5 ( $\parallel c$ ) | 160 [132]<br>435 [288] |
| $\text{Bi}_2\text{S}_3$  | —                                     | 200 [123]                                       | —                                               | 13 ( $\parallel c$ )<br>9 ( $\perp c$ )      | 38 ( $\perp c$ )<br>120 ( $\parallel c$ )   | 180 [132]              |
| $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ | 0,12 [294]                            | 600—2000 [114]<br>( $\infty T^{-7/2}$ )         | 40 [294]                                        | 29 ( $\perp c$ )                             | 113 ( $\perp c$ )<br>100 [288]              | 165 [294]              |
| $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ | 0,24 [123]<br>0,35 ( $m_{dn}$ ) [294] | 1200 [13]<br>( $\infty T^{-1/2}$ )              | 600 ( $\infty T^{-2}$ ) [13]                    | 50 ( $\parallel c$ )<br>85 ( $\perp c$ )     | 360 [288]                                   | —                      |
| $\text{BiSe}$            | —                                     | 20 [288]                                        | —                                               | —                                            | —                                           | —                      |

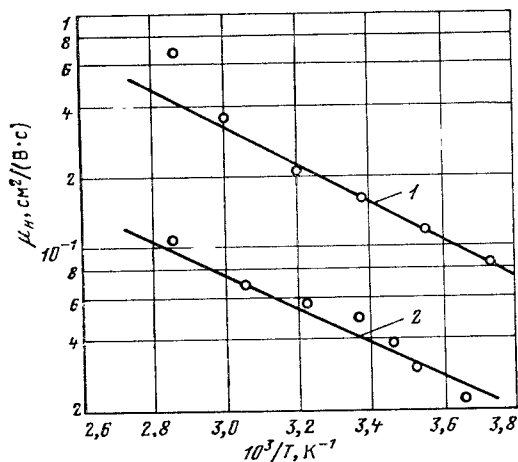


Рис. 22.220. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок (поперек слоев) в двух кристаллах  $\text{As}_2\text{S}_3$  [268]:  
в кристалле 2 — большая, чем в кристалле 1, концентрация ловушек

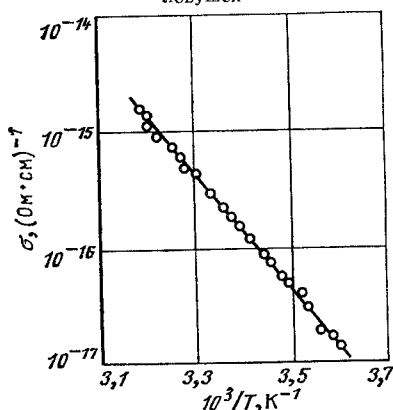


Рис. 22.221. Температурная зависимость проводимости (поперек слоев) для  $\text{As}_2\text{Se}_3$  [261]

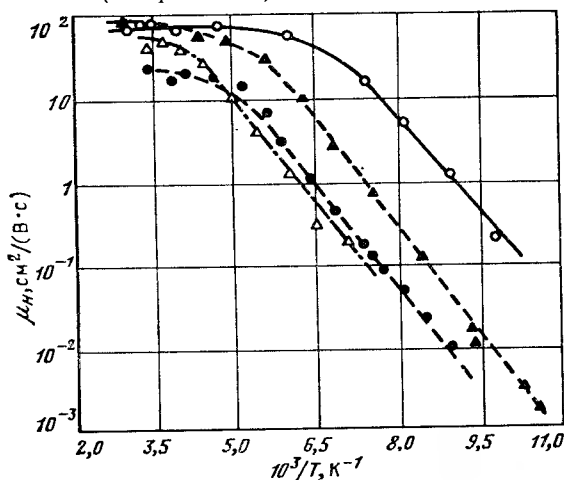


Рис. 22.222. Температурные зависимости дрейфовой подвижности электронов (поперек слоев) в различных кристаллах  $\text{As}_2\text{Se}_3$  [261]:

отношение концентрации ловушек к эффективной плотности состояний в зоне проводимости:  $\circ$  —  $10^{-5}$ ;  $\blacktriangle$  —  $2 \cdot 10^{-5}$ ;  $\bullet$  —  $9 \cdot 10^{-5}$ ;  $\triangle$  —  $3 \cdot 10^{-4}$

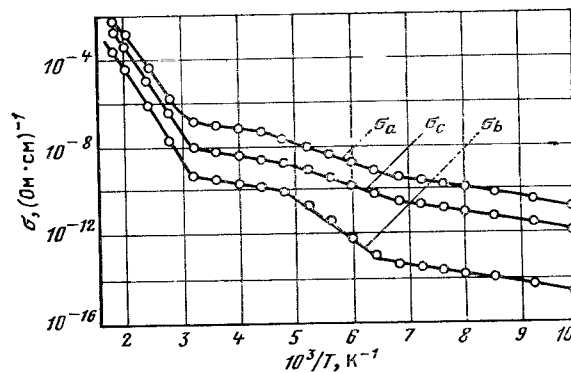


Рис. 22.223. Температурные зависимости проводимости  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  вдоль осей  $a$ ,  $b$ ,  $c$  [258]

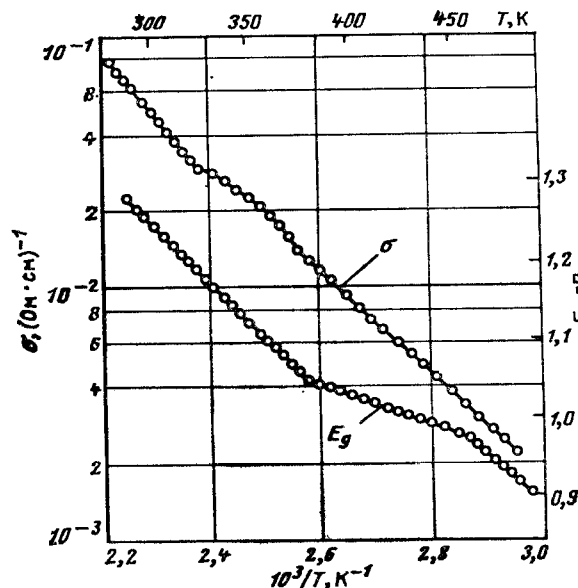


Рис. 22.224. Температурные зависимости проводимости (вдоль оси  $c$ ) и ширины запрещенной зоны  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  [248]

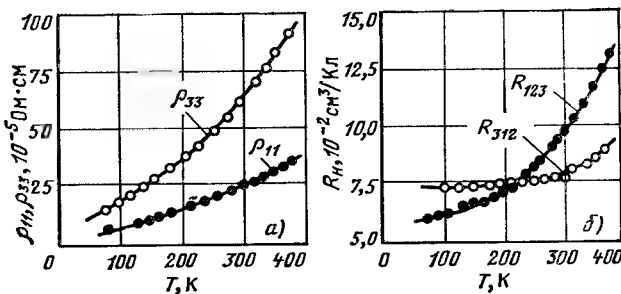


Рис. 22.225. Температурная зависимость удельного сопротивления (а) вдоль ( $\rho_{33}$ ) и поперек ( $\rho_{11}$ ) оси  $c$  и коэффициентов Холла (б) в геометрии  $I \parallel c \perp B$  ( $R_{312}$ ) и  $I \perp c \parallel B$  ( $R_{123}$ ) для  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  [206]

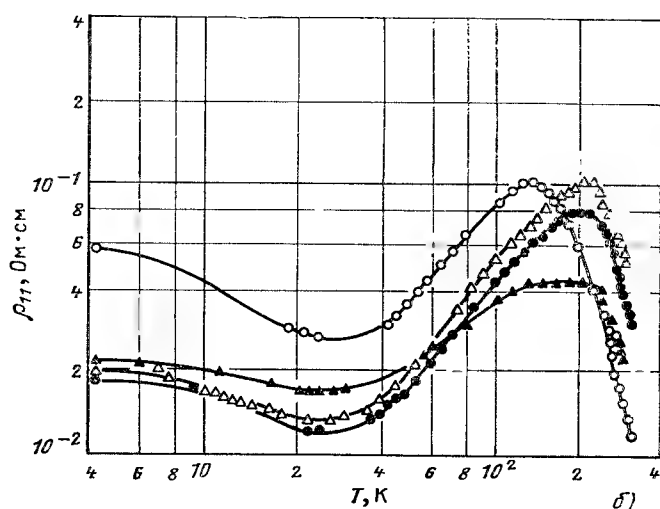
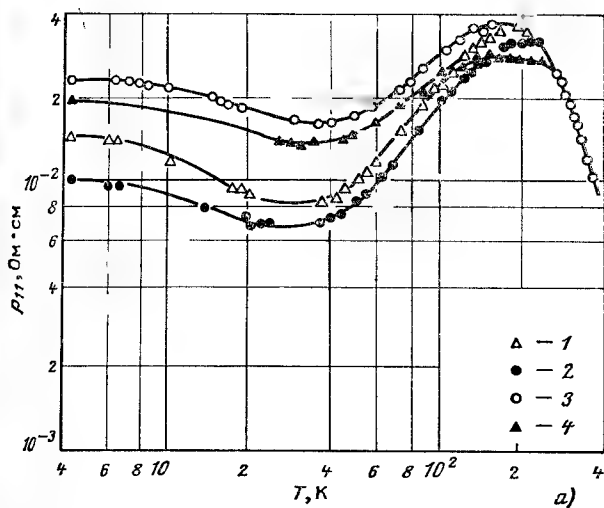


Рис. 22.226. Температурные зависимости удельного сопротивления (поперек оси  $c$ ) кристаллов  $n\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  (а) и  $p\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  (б) [203]: концентрация носителей растет от 1 к 4

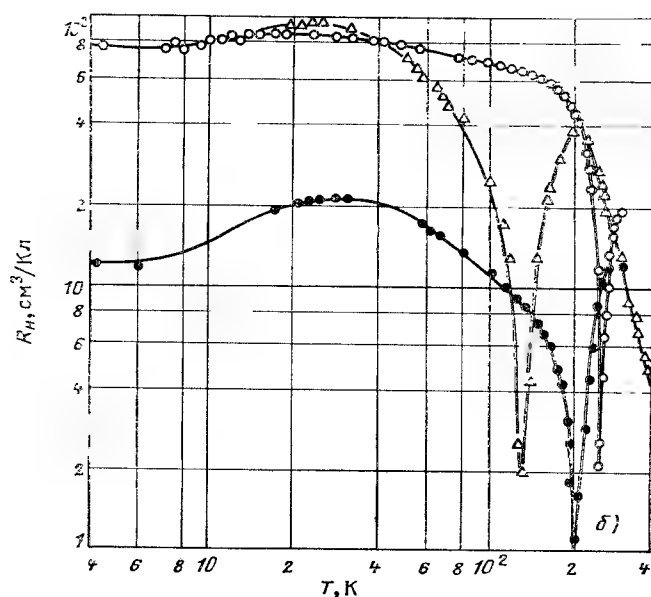
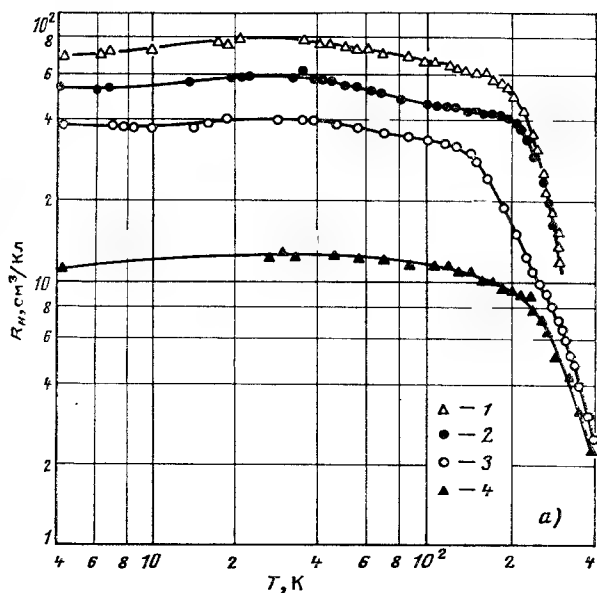


Рис. 22.227. Температурные зависимости коэффициента Холла в геометрии  $I \parallel c \perp B$  для кристаллов  $n\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  (а) и  $p\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  (б) [203]: кристаллы те же, что на рис. 22.226

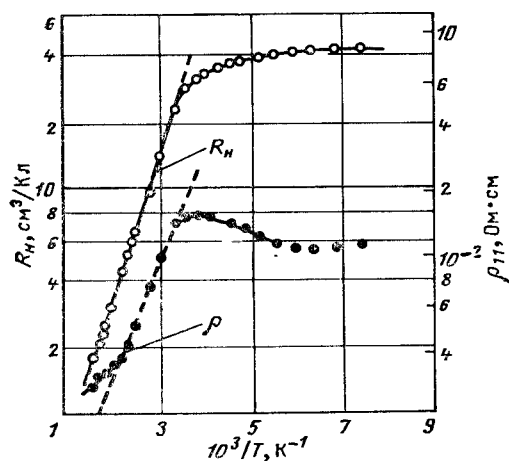


Рис. 22.228. Температурные зависимости удельного сопротивления (поперек оси  $c$ ) и коэффициента Холла в геометрии  $I||c \perp B$  для  $n\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  в области собственной проводимости [203]

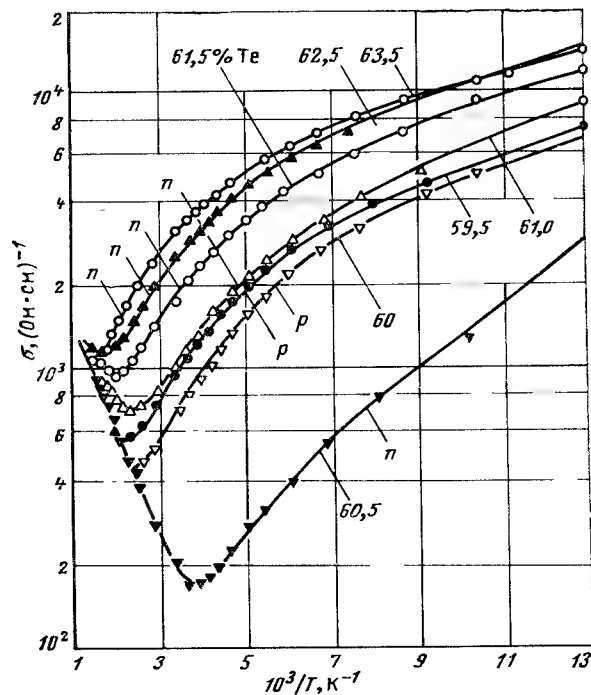


Рис. 22.230. Температурные зависимости проводимости (поперек оси  $c$ ) для кристаллов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$   $n$ - и  $p$ -типа [203]: числа у кривых — атомное содержание  $\text{Te}$ , %

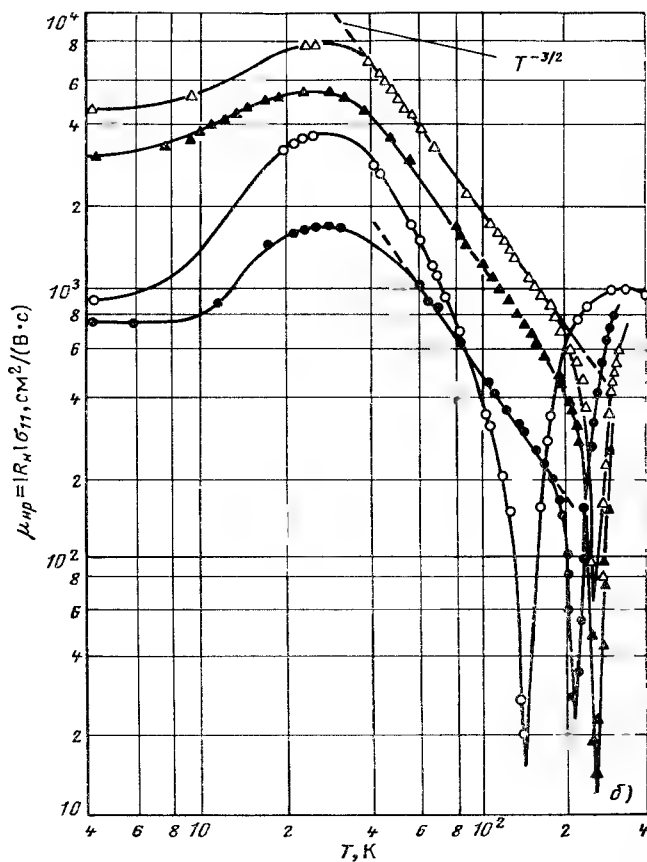
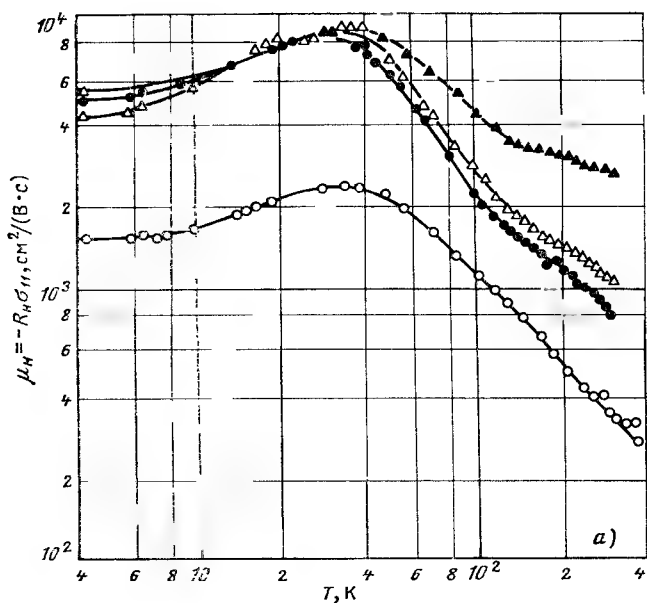


Рис. 22.229. Температурные зависимости холловской подвижности электронов (а) и дырок (б) в кристаллах  $n\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  (а) и  $p\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  (б) [203]:

концентрация носителей,  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ :  $\circ$  — 1,6 (а); 0,69 (б);  $\bullet$  — 1,2 (а); 5,4 (б);  $\triangle$  — 0,87 (а); 6,7 (б);  $\blacktriangle$  — 5,4 (а); 0,72 (б)

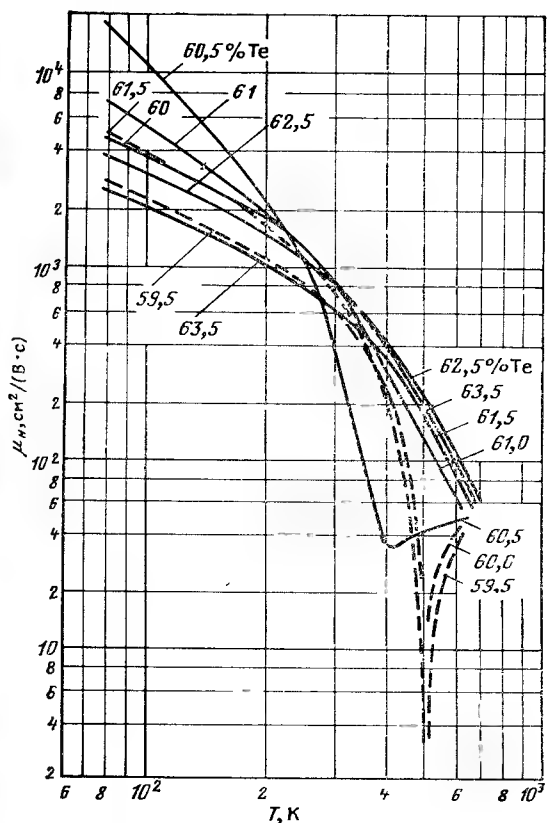


Рис. 22.231. Температурная зависимость холловской подвижности носителей поперек оси  $c$  в кристаллах  $n$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (пунктирные линии) и  $p$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (сплошные линии) [128]:

числа у кривых — атомное содержание  $\text{Te}$ , %

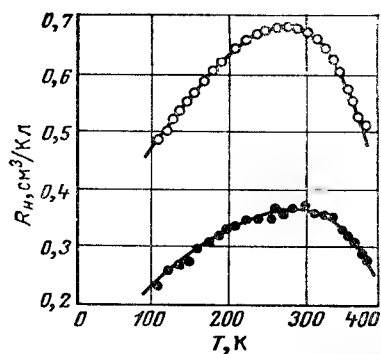


Рис. 22.232. Температурные зависимости коэффициента Холла для  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  в геометрии  $I \perp c \parallel B$  (●) и  $I \perp c \perp B$  (○) [174]

### 22.3.6. Соединения типа $A^{\text{VI}}B^{\text{IV}}-A^{\text{VI}}B^{\text{VI}}$

Известно полупроводниковое соединение типа  $A^{\text{VI}}B^{\text{VI}}$   $p$ - $\text{CrSi}_2$  с очень малой подвижностью дырок ( $E_g = 1,3$  эВ [16])

Таблица 22.26. Полупроводниковые соединения  $A^{\text{VI}}B^{\text{VI}}$

| Соединение              | Кристаллическая структура |                                                      | $E_g$ , эВ      | $\mu_n, \mu_p$ , $\text{cm}^2/(\text{B} \cdot \text{c})$ |
|-------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------|
|                         | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                                       |                 |                                                          |
| $\text{CrO}_3$          | Куб., $C_{2v}^{16}$       | 0,5743 ( $a$ ); 0,8557 ( $b$ ); 0,4789 ( $c$ ) [242] | 1,4 [242]       | —                                                        |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | Гекс., $D_{3d}^6$         | 0,4954 ( $a$ ); 0,13584 ( $c$ ) [242]                | 1,59—1,63 [242] | —                                                        |
| $\text{CrTe}_2$         | —                         | —                                                    | 0,17 [16]       | 12 ( $\mu_n$ ) (70)                                      |
| $\text{MoS}_2$          | Гекс., $D_{6h}^4$         | 0,315 ( $a$ ); 0,1230 ( $c$ ) [1]                    | 1,2 [10]        | 200 — 300 ( $\mu_p$ ) [249]                              |
| $\text{TeO}_2$          | Тетр., $D_{4h}^{14}$      | 0,479 ( $a$ ); 0,377 ( $c$ ) [1]                     | 1,5 [10]        | —                                                        |

Таблица 22.27. Электрофизические свойства сплавов  $\text{Se}_x\text{Te}_{1-x}$  [293]

| Кристаллическая структура |                                                     | $\rho$ , г/см <sup>3</sup>           | $E_g$ , эВ                                                 | $(n_i n_p)^{1/2} / m_0$               | $\eta_i$ , см <sup>-3</sup>   | $\mu_n$ ( $\parallel c$ ), см <sup>2</sup> /(В·с) | $\mu_p$ ( $\parallel c$ ), см <sup>2</sup> /(В·с)                       |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Система                   | $a, b, c$ , нм                                      |                                      |                                                            |                                       |                               |                                                   |                                                                         |
| Триг.                     | $x = 0 - 1$ ;<br>0,446—0,438 (a)<br>0,593—0,492 (c) | 6,2 ( $x=0,05$ )<br>5,01 ( $x=0,9$ ) | 0,36 ( $x=0,016$ )<br>0,2 ( $x=0,55$ )<br>0,4 ( $x=0,85$ ) | 0,17 ( $x=0,05$ )<br>0,22 ( $x=0,1$ ) | $10^{14}-10^{16}$ ( $x=0-1$ ) | 10000 ( $x=0,1$ )                                 | 1000 ( $x=0,1$ )<br>350 ( $x=0,2$ )<br>17 ( $x=0,5$ )<br>48 ( $x=0,8$ ) |

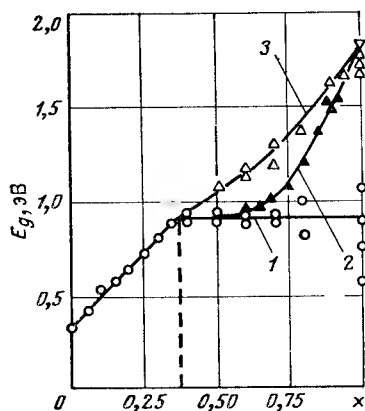


Рис. 22.233. Зависимость ширины запрещенной зоны  $E_g$  в  $\text{Se}_x\text{Te}_{1-x}$  от  $x$  [111]:  
1 — собственная проводимость; 2 — фотопроводимость; 3 — температурная зависимость проводимости

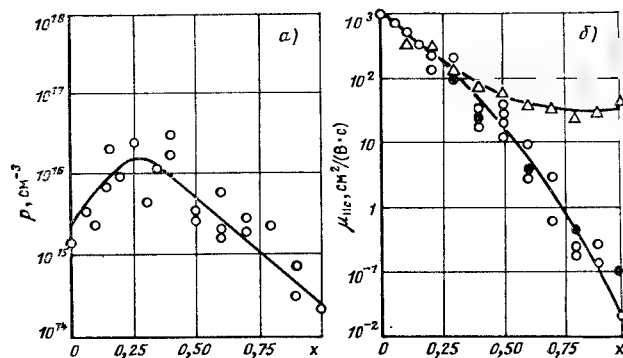


Рис. 22.234. Зависимости концентрации дырок в  $\text{Se}_x\text{Te}_{1-x}$  от  $x$  из данных по измерению термо-ЭДС [87] (a) и подвижности дырок в  $\text{Se}_x\text{Te}_{1-x}$  от  $x$  при  $T = 300$  К (b), определенные различными методами [111]:  
 $\Delta$  — по магнетосопротивлению;  $\circ$  — по термо-ЭДС;  $\bullet$  — по эффекту Холла

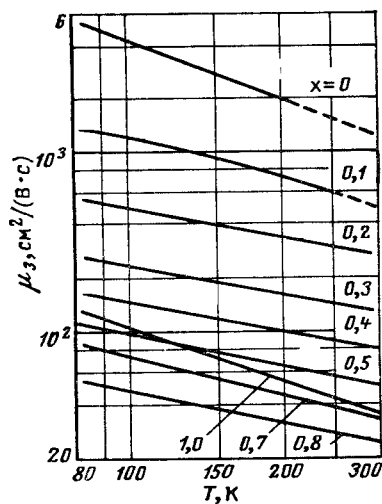


Рис. 22.235. Температурная зависимость подвижности дырок в  $\text{Se}_x\text{Te}_{1-x}$  в направлении оси  $c$  при различных значениях  $x$  (из данных по измерению магнетосопротивления) [87]

### 22.3.7. Соединения типа $A^{\text{VII}}B^{\text{III}}-A^{\text{VII}}-B^{\text{VI}}$

Известны полупроводниковые соединения  $\text{MnAl}_3$  типа  $A^{\text{VII}}B^{\text{III}}$  ( $E_g = 0,45 \div 0,58$  эВ,  $\mu_n \geq 200$  см<sup>2</sup>/(В·с),  $\mu_p \sim 200$  см<sup>2</sup>/(В·с) [242]) и  $\text{ReSi}_2$  типа  $A^{\text{VII}}B^{\text{VI}}$  ( $E_g = 0,13$  эВ [16]) и  $\text{MnSi}$ , кристаллизующееся в кубической решетке ( $a = 0,456$  нм,  $E_g = 0,5 \div 0,6$  эВ,  $\mu_p = 10 \div 40$  см<sup>2</sup>/(В·с) [242]).

Таблица 22.28. Полупроводниковые соединения  $A^{VII}B^{VI}$  [288]

| Соединение                     | Кристаллическая структура |                                    | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $T_{пл}$ , К | $T_D$ , К | $T_N^{*1}$ , К | $E_g$ , эВ |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------|-----------|----------------|------------|
|                                | Система                   | $a, b, c$ , нм                     |                            |              |           |                |            |
| MnS                            | Куб.                      | 0,522                              | 3,83                       | 1890         | —         | 150            | —          |
| MnSe                           | То же                     | 0,545                              | 5,35                       | 1780         | 360       | 150            | 0,7        |
| MnTe <sup>*2</sup>             | Гекс.                     | 0,415 (a); 0,671 (c)               | —                          | 1470         | 160       | 310            | 1,3        |
| MnS <sub>2</sub>               | Куб., $T^6$               | 0,610                              | —                          | 677          | —         | 48             | —          |
| MnSe <sub>2</sub>              | То же                     | 0,643                              | —                          | 863          | —         | 75             | 0,15       |
| MnTe <sub>2</sub>              | То же                     | 0,695                              | —                          | 1010         | —         | 84             | 0,01—0,04  |
| MnO <sub>2</sub> <sup>*3</sup> | Ромб.                     | 0,927 (a); 0,287 (b);<br>0,453 (c) | —                          | —            | —         | 92             | 0,13—0,19  |

<sup>\*1</sup> Все соединения, приведенные в табл. 22.28, — антиферромагнетики,  $T_N$  — температура Нееля.

<sup>\*2</sup>  $m_p/m_0 = 0,25$  ( $\perp c$ ) и 0,47;  $\mu_n \approx 1$  см<sup>2</sup>/(В·с) [106].

<sup>\*3</sup>  $\mu_n \approx 1,2$  см<sup>2</sup>/(В·с) [242].

22.3.8. Соединения типа  $A^{VII}B^{VI}$ — $A^{VIII}B^{VI}$ 

Соединения типа  $A^{VIII}B^{VI}$  изучены слабо. Зона проводимости PtSb<sub>2</sub> — восемь эллипсоидов вращения, боль-

шие оси которых направлены вдоль [111]. Валентная зона — шесть эллипсоидов вращения, расположенных вдоль осей [100] [41]. Энергия прямого перехода  $E_d = 0,4$  эВ,  $E_g$  соответствует непрямоу переходу [175].

Таблица 22.29. Полупроводниковые соединения  $A^{VIII}B^{VI}$ 

| Соединение                     | Кристаллическая структура |                                        | $T_{пл}$ , К | $E_g$ , эВ             | $m_n/m_0$                  | $m_p/m_0$                                                                                                             | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В·с)  |
|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|--------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                                | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                         |              |                        |                            |                                                                                                                       |                                   |
| CoSb <sub>2</sub>              | Орторомб.                 | 0,321 (a); 0,578 (b);<br>0,642 (c) [1] | —            | 0,2 [16]               | —                          | —                                                                                                                     | 300 [16]                          |
| CoSb <sub>3</sub>              | Куб., $T_h^5$             | 0,9034 [242]<br>0,9936 [242]           | 1131 [249]   | 0,5 [16, 249]          | —                          | —                                                                                                                     | —                                 |
| PtSb <sub>2</sub> <sup>*</sup> | Куб., $T_h^6$             | 0,643 [1]                              | 1503 [41]    | 0,08 [41]<br>0,1 [288] | 0,42—0,54 [41]<br>1,4 [41] | 0,57—0,72 ( $m_d$ ) [41]<br>0,168 ( $m_{  }$ ) [175]<br>0,098 ( $m_{\perp 1}$ ) [175]<br>0,06 ( $m_{\perp 2}$ ) [175] | $3,26 \cdot 10^6 T^{-1,57}$ [288] |

\*  $\epsilon_0 = 32$ ;  $n_i = 1,32 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp(0,11 \text{ эВ}/2 kT)$  [288].

Таблица 22.30. Полупроводниковые соединения  $A^{VIII}B^{VI}$ 

| Соединение                     | Кристаллическая структура |                                        | $T_{пл}$ , К            | $E_g$ , эВ             | $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /(В·с) |
|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|
|                                | Система, группа           | $a, b, c$ , нм                         |                         |                        |                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ромбоэдр.                 | 0,5427 [242]                           | 1500 [242]<br>1838 [16] | 1,6 [16]<br>2,2 [242]  | —                                |
| FeS <sub>2</sub>               | Куб., $T_h^5$             | 0,5405 [242]                           | 962 [249]               | 1,25 [16]              | 200 [16]                         |
| FeS <sub>2</sub>               | Ромб., $D_{2h}^{12}$      | 0,358 (a); 0,479 (b);<br>0,572 (c) [1] | 1183 <sup>*1</sup> [16] | 0,95 [16]              | —                                |
| FeTe <sub>2</sub>              | То же                     | 0,385 (a); 0,534 (b);<br>0,626 (c) [1] | 1015 <sup>*1</sup> [16] | 0,46 [16]              | 1 [51]                           |
| NiO <sup>*2</sup>              | Куб., $O_h^5$             | 0,418 [1]                              | 3170 [42]               | 3,7 <sup>*3</sup> [95] | 0,2 [25]<br>0,1 [95]             |

<sup>\*1</sup> Приведена температура кристаллизации, так как эти дихалькогениды плавятся с разложением.

<sup>\*2</sup>  $\rho = 6,6$  г/см<sup>3</sup> [132];  $\epsilon_0 = 11,9$ ;  $\epsilon_{\infty} = 4,75$  [29]. Полярный полупроводник может обладать магнитным порядком.

<sup>\*3</sup> Соответствует не ширине запрещенной зоны, а электронному переходу  $3d \rightarrow 4s$ , ширина запрещенной зоны значительно больше.



# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Landoit-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik. Berlin: J. Springer. 1955. Bd. 1, S. 4.
2. Wickoff R. W. G. Crystall Structures N. Y.: Intersci. Publ. 1953.
3. Харцев В. Е.//Физика твердого тела. 1962. Т. 4. С. 433—436.
4. Horn F. H.//Boron/Ed.: Kohn J. A., Nye W. F., Ganle C. K., N. Y. Plenum Press. 1960. Vol. 1. P. 111—118.
5. Голикова О. А., Соловьев Н. Е., Угай Я. А., Фейгельман В. А.//Физ. и техн. полупроводников. 1979. Т. 13. С. 825—827.
6. Golikova O. A.//J. Less-Common Met. 1982. Vol. 82. P. 362—366.
7. Голикова О. А., Жубанов М. Ж., Климашин Г. Н.//Физ. и техн. полупроводников. 1968. Т. 2. С. 548—551.
8. Asanable S.//J. Phys. Soc. Jap. 1960. Vol. 15. P. 989—995.
9. Harbeke G., Tosatti E.//Proc. 12 Intern. Conf. Phys. Sem. Stuttgart 1974. P. 626—629.
10. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.
11. Смит Р. Полупроводники: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.
12. Ybuki I.//J. Phys. Soc. Jap. 1955. Vol. 10. P. 549—563.
13. Drabble G.//J. Phys. Soc. 1956. Vol. B69. P. 1101—1140. 1958. Vol. B72. P. 380—387.
14. Golikova O. A., Subanov M. Z.//Boron/Ed. Niemyski T. Warsaw. Pol. Sci. Publ. 1970. Vol. 3. P. 269—273.
15. Rodot M.//Phys. Stat. Sol. 1963. Vol. 3. P. 10—13.
16. Угай Я. А. Введение в химию полупроводников. М.: Высшая школа. 1965.
17. Warschauer D.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1853—1858.
18. Кот М. В., Крецу Л. В.//Изв. АН СССР Сер. физ. 1964. Т. 281. С. 259—299.
19. Mort J.//Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 18. P. 540—547.
20. Caywood J. M., Mead C. A.//J. Phys. Chem. Sol. 1970. Vol. 31. P. 983—985.
21. Hopfield J. J., Thomas D. G.//Phys. Rev. 1961. Vol. 122. P. 35—38.
22. Dimmock J. O., Wheeler R. J.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2271—2277.
23. Neguet P. C.//J. Phys. 1965. Vol. 26. P. 317—323.
24. Lavine C. F., Ewald A. W.//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 1121—1123.
25. Богомолов В. Н., Кудинов Е. К., Фирсов Е. А.//Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 3175—3191.
26. Prener I., Woodbury H. H.//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris. 1964. P. 1231—1236.
27. Хилсум К., Роуз-Инс А. Полупроводники типа А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.
28. Мосс Т. Оптические свойства полупроводников: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1961.
29. Бреслер М. С., Редько Н. А.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 34. С. 149—154.
30. Grosse P. Springer Tracts in Modern Phys.//Ed.: G. Hohler. Berlin—Heidelberg—N. Y.: J. Springer. 1969. Vol. 48.
31. Грамацкий В. И., Мушинский В. П.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 28. С. 1077—1087.
32. Ахундов А., Абдуллаев Г. Б., Гуссейнов Г. Д.//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris. 1964. P. 1277—1282.
33. Veric C. New Develop. Semiconductors. Leyden, 1973. P. 524—519.
34. Мирзабаев М., Тучкевич В. М., Шмарцев Ю. В.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 28. С. 1300—1309.
35. Парфеньев Р. В., Погарский А. М., Фарбштейн И. И.//Физика твердого тела. 1963. Т. 4. С. 2630—2637.
36. Evans R. L., Hazelwood R. A.//P. Phys. D. 1969. Vol. 2. P. 1507—1512.
37. Gibbons Dy., Spear W. E.//J. Phys. Chem. Sol. 1966. Vol. 27. P. 1917—1923.
38. Fuldner J. e. a.//Proc. XI Conf. Phys. Semicond., Warsaw, 1972. P. 351—357.
39. Nitzki V., Stossel W.//Phys. Stat. Sol. 1970. 39(b). P. 309—313.
40. Rodot M.//Compt. Rend. Acad. Sci. 1965. Vol. 260. P. 1908—1911.
41. Emtage P. R.//Phys. Rev. 1965. Vol. 138. P. 24—311.
42. Botling J. F.//J. Chem. Phys. 1960. Vol. 33. P. 305—311.
43. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам/Под ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергия. 1972.
44. Von Liebe L.//Ann. Phys. 1965. Bd. 7, № 15. S. 179—183.
45. Salzer O., Nieke H.//Ann. Phys. 1965. Bd. 7. S. 192—198.
46. Onuki/J. Phys. Soc. Jap. 1965. Vol. 20. P. 171—177.
47. Кот М. В., Панасюк Л. М., Симашкевич А. В., Цуркан А. Е.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 1242—1243.
48. Yashke R.//Ann. Phys. 1965. Bd. 7. № 15. S. 106—109.
49. Ломакина Г. А.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 600—608.
50. Komiga H.//Phys. Rev. 1964. Vol. 133. P. A1679—A1682.
51. Suchet J.//Compt. Rend. Acad. Sci. 1964. Vol. 259. P. 3219—3262.
52. Rosenman M. J.//Ibid. 1964. Vol. 259. J. 2621—2622.
53. Adams A. R., Spear W. E.//J. Phys. Chem. Sol. 1964. Vol. 25. P. 1113—1118.
54. Hacke J.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 2484—2487.
55. Redin A. D.//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1916—1919.

56. Rodot M.//Compt. rend. Acad. Sci. 1964. Vol. 258. P. 5414—5418.
57. Jeavons A. P., Saunders Y. A.//Phys. Roy. Soc. 1969. Vol. A310. P. 415—421.
58. Bludau W., Onten A., Heinke W.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 1846—1852.
59. Dunstader H.//Z. Phys. 1954. Bd. 137. S. 383—388.
60. Вольфштейн В. М., Фистуль В. И.//Электроника и ее применение. Сер. Итоги науки и техники. М.: Изд. ВНИИТАН АН СССР, 1979. Т. 4.
61. Соммер А. Х. Фотоэмиссионные материалы: Пер. с англ. М.: Мир. 1972.
62. Физические свойства халькогенидов — редкоземельных элементов/Под ред. В. П. Жузе. Л.: Наука. 1973.
63. Irvin J. C.//Bell Syst. Tech. J. 1962. Vol. 41. P. 387—393.
64. Jacoboni C., Canali C., Ottaviani G., Alberigi Quaranta A.//Solid. Stat. Electron. 1977. Vol. 20. P. 77—81.
65. McLean T. P.//Progress in Semiconductors/Ed. A. F. Gibson. Lond.: Heywood. 1960. Vol. 5.
66. Park V. S.//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 512—515.
67. Lott S. A., Synch D. W.//Phys. Rev. 1966. Vol. 141. P. 681—688.
68. Camassel J., Auvergne D., Matthieu H. e. a.//Sol. Stat. Comm. 1973. Vol. 13. P. 63—68.
69. Marby J. A.//Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. 304—312.
70. Arumi Z., Mancu P.//Rend. Semin. Fac. Sci. Univ. Cagliari, 1963. Vol. 33, № 3—4. P. 26—29.
71. Morin F. J.//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 62—69.
72. Prince M. B.//Ibid. 1953. Vol. 92. P. 681—688.
73. Голикова О. А., Мойжес Б. Я., Стильбаис Л. С.//Физика твердого тела. 1961. Т. 3. С. 3105—3109.
74. Logan R. A., Rowell J. M., Trumbore F. A.//Phys. Rev. 1964. Vol. 136A. P. 1751—1763.
75. Whitaker J.//Sol. Stat. e Electron. 1965. Vol. 8. P. 649—652.
76. Braunstein R., Moore A. R., Herman F.//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 695—703.
77. Zdanowich W., Wojkowski A.//Phys. Stat. Sol. 1965. Vol. 8. P. 569—574.
78. Douglas R.//J. Phys. Chem. Sol. 1965. Vol. 21. P. 329—334.
79. Richard D.//Ibid. 1965. Vol. 26. P. 439—443.
80. Busch G., Vogt O.//Helv. Phys. Acta. 1960. Vol. 33. P. 437—447.
81. Wooten J., Condas Y. A.//Phys. Rev. 1963. Vol. 131. P. 657—662.
82. Tamura H., Masumi T.//Sol. Stat. Commun. 1973. Vol. 12. P. 1183—1185.
83. Hall R. F., Wright H. C.//Brit. J. Appl. Phys. 1967. Vol. 18. P. 33—38.
84. Цидильковский И. М. Электроны и дырки в полупроводниках. М.: Наука. 1972.
85. Орлова Н. И., Шишкин П. Т.//Изв. АН СССР. Сер. физ.-мат. 1964. № 4. С. 53—59.
86. Winker H.//Helv. Phys. Acta. 1955. Vol. 28. P. 633—639.
87. Meli H., Stuke J.//Phys. Stat. Sol. 1971. Vol. 45. P. 163—167.
88. Сорокин Г. П.//Изв. вузов. Сер. физ. 1965. № 4. С. 140—144.
89. Wallis Y.//Ann. Phys. 1956. Vol. 17. P. 401—403.
90. Pollack Y. P., Trivich D.//J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. P. 163—165.
91. Okamoto K., Kawai S.//Jap. J. Appl. Phys. 1973. Vol. 12. P. 1130—1138.
92. Восканян А. А., Инглизьян П. Н., Лалыкин С. П.//Физ. и техн. полупроводников. 1978. Т. 12. С. 2096—2099.
93. Горбачев В. В., Путилин И. М.//Phys. Stat. Sol. (a). 1973. Vol. 16. P. 553—559.
94. Сорокин Г. П., Пеншев Ю. М., Оуш П. Т.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 2244—2245.
95. Ксэндзов Я. М., Драбкин И. А. Там же. 1965. Т. 7. С. 1884—1887.
96. Fortin E., Weichman F. L.//Phys. Stat. Sol. 1964. Vol. 5. P. 515—519.
97. Junod P. e. a.//Phil. Mag. 1977. Vol. 36. P. 941—952.
98. Алиев С. А., Суюнов У. Х., Араслы Д. Г., Алиев М. И.//Физ. и техн. полупроводников. 1973. Т. 7. С. 1086—1091.
99. Aulich E., Brebner J. L., Mooser E.//Phys. Stat. Sol. 1969. Vol. 31. P. 129—137.
100. Угай Я. А., Завальский Ю. П., Угай В. А.//Докл. АН СССР. 1965. Т. 163. С. 663—666.
101. Junod P.//Helv. Phys. Acta. 1959. Vol. 32. P. 567, 601—604.
102. Davlen V. R. M.//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 666—669.
103. Komiga H.//Ibid. 1964. Vol. A133. P. 679—687.
104. Minder R., Ottaviani G., Canali C.//J. Phys. Chem. Sol. 1976. Vol. 37. P. 417—424.
105. Leotin J., Barbaste R., Askenazy S. e. a.//Sol. Stat. Commun. 1974. Vol. 15. P. 693—699.
106. Wassher J. D., Seuter R. M. J., Haas C.//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris. 1964. P. 1269—1275.
107. Коломиец Б. Т., Лебедев Е. А., Мазек Ф. Т. и др. — Ibid P. 1283—1286.
108. Wood C., Harrap C., Kane W. M.//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 978—983.
109. Masumi T., Ahrenkiel R. K., Brown F. C.//Phys. Stat. Sol. 1965. Vol. 11. P. 163—167.
110. Ponpon L. P.//IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. Vol. S—22. P. 182—186.
111. Beyer W., Meli H., Stuke J.//Phys. Stat. Sol. (b). 1971. Vol. 45. P. 153—162.
112. Krevs V. E., Lutsiv R. V., Pashovskii M. B., Retrov P. P.//Ibid. 1974. Vol. 65. P. K43—K45.
113. Hanson R. C.//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66. P. 2376—2383.
114. Абрикосов Н. Х. и др. Полупроводниковые соединения, их получение и свойства. М.: Наука. 1967.

115. Reimherr A.//General Survey of the Semiconductor Field. National Bureau of Standards. Technical Note. 1962. P. 153—157.
116. Полупроводники/под ред. Н. Б. Хенней: Пер. с англ. и нем. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.
117. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах/Под ред. К. Хоггарта: Пер. с англ. М.: Мир. 1968.
118. Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials. Purdue Univer. 1967.
119. Burnham D. C., Brown F. C., Knox R. S.//Phys. Rev. 1960. Vol. 119. P. 1560—1568.
120. Ahrenkiel R. K.//Phys. Rev. 1969. Vol. 18. P. 180—188.
121. Горюнова Н. А. Сложные алмазоподобные полупроводники. М.: Советское радио. 1968.
122. Wagrur R. J., Ewald K. A.//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 697—673.
123. Родо М. Полупроводниковые материалы: Пер. с франц. М.: Металлургия. 1971.
124. Добролеж С. А. Карбид кремния. Киев: Гос. изд-во техн. лит. УССР. 1963.
125. Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. — М.: Наука. 1968.
126. Коломиец Н. В., Лев Е. Я., Сысоева Л. М.//Физика твердого тела. 1963. Т. 5. С. 2871—2878.
127. Albers W. e. a. /J. Appl. Phys. Suppl. 1961. Vol. 32. P. 2220—2231.
128. Champness C. H., Kipling A. L.//Can. J. Phys. 1966. V. 44. P. 769—773.
129. Соболев В. В.//Физика твердого тела. 1970. Т. 12. С. 2687—2693.
130. Cuhn M. L., Au-Yang M. T.//Phys. Rev. 1969. Vol. 178. P. 1358—1362.
131. Winkler H.//Helv. Phys. Acta. 1955. Vol. 28. P. 663—669.
132. Agrain P., Balkansky M. Table de constante des Semiconducteurs. Paris: Pergamon Press, 1961.
133. Turner W. J., Fisher A. S., Reese W. E.//J. Appl. Phys. 1961. Suppl. Vol. 32. P. 2241—2249.
134. Heller M. W., Danielson Y. C.//J. Phys. Chem. Sol. 1962. Vol. 23. P. 601—608.
135. Redin R. D., Morris R. G., Danielson G. C.//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1916—1920.
136. Li P. W., Lee S. N., Danielson G. C.//Ibid. 1972. Vol. B6. P. 442—453.
137. Crossman L. D., Danielson G. C.//Ibid. 1968. Vol. 171. P. 867—872.
138. Физика и химия соединений типа  $ABV_6$ : Пер. с англ./Под ред. А. С. Медведева. М.: Мир. 1970.
139. Hamilton P. H.//Semicond. Proc. Sol. Stat. Technol. 1964. Vol. 7, № 6. P. 15—19.
140. Betts D. D.//Canad. J. Phys. 1961. Vol. 39. P. 223—231.
141. Robic R. A., Edwards J. L.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2659—2673.
142. Rode D. L.//Phys. Rev. 1970. Vol. B2. P. 4036—4043.
143. Милославский В. К., Шкляревский О. Н.//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 926—929.
144. Watanabe H., Wada H., Takahashi T.//Jap. J. Appl. Phys. 1964. Vol. 3. P. 617—621.
145. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и их применение: Пер. с англ. М.: Мир. 1969.
146. Umeda J.//J. Phys. Soc. Jap. 1964. Vol. 19. P. 2052—2058.
147. Geik R., Hakel W. J., Perry C. H.//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 824—827.
148. Balkansky M., Zellag B. A. M., Longen D.//J. Phys. Chem. 1966. Vol. 27. P. 299—304.
149. Segall B., Lorenz M., Woodbury H.//Phys. Rev. 1963. Vol. 129. P. 2471—2477.
150. Медведева З. С. Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. М.: Наука. 1968.
151. Tagiev B. F.//Phys. Stat. Sol. (a). 1970. Vol. 3. P. K119—K120.
152. Catsuyama C., Watanabe Y., Hamaguchi C. e. a.//J. Phys. Soc. Jap. 1970. Vol. 29. P. 150—155.
153. Aven M.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 1204—1207.
154. Park Y. S., Hemenger P. M., Chung C. H.//Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. P. 45—49.
155. Reignold D. G., Litton C. W., Collins T.//Phys. Rev. 1965. Vol. 146. P. 1726—1729.
156. Seiler D. G., Galazka R. R., Becher W. M.//Ibid. 1971. Vol. B3. P. 4274—4288.
157. Баширов Р. И., Таджиев Р. М.//Физика твердого тела. 1970. Т. 4. С. 1936—1943.
158. Bush G., Moldanova M.//Helv. Phys. Acta. 1962. Vol. 35. P. 500—508.
159. Dietz R. F., Hopfield J. J., Thomas D. G.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2282—2289.
160. Pigon K.//Helv. Phys. Acta. 1968. Vol. 41. P. 1194—1109.
161. Fisher P., Fan H.//Bull. Amer. Phys. Soc. 1959. Vol. 4. P. 409—415.
162. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз. 1963.
163. Zdanowicz W., Kenkie Z.//Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. Chem. 1964. Vol. 12. P. 729—734.
164. Fingold L.//Phys. Rev. Lett. 1964. Vol. 13. P. 233—238.
165. Шевченко В. Я.//Журн. неорганические материалы. 1975. Т. 11. С. 1719—1726.
166. Zdanowicz W., Wielzak B., Zdanowicz P.//Acta Phys. Polon. 1975. Vol. A48. P. 27—31.
167. Turner W. C., Fischer A. S., Reese W. G.//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 759—767.
168. Black J.//Phys. Chem. Sol. 1957. Vol. 2. P. 240—248.
169. Смирнов И. А., Шадричев Е. В., Кутасов В. А.//Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 3311—3319.
170. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп: Пер. с англ. М.: Мир. 1967.
171. Long D. Energy Bands in Semiconductors. N. Y.—Lond.: Sydney Interscience Publ. A Division John Wiley and Sons. 1968.
172. Minden H. T.//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17. P. 358—364.
173. Kessler F. R.//Phys. Stat. Sol. 1964. Vol. 6. P. 3—9.
174. Stordeur M., Kuhnberger W.//Phys. Stat. Sol. (b) 1975. Vol. 69. P. 377—385.
175. Damon D. H., Miller R. C., Emtage P. R.//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 2175—2183.
176. Becla P., Gummieuny Z., Misiewicz J.//Opt. Appl. 1979. Vol. 9. P. 143—149.
177. Шевченко В. Я., Маренкин С. Ф., Пономарев В. Ф.//Журн. неорганические материалы. 1977. Т. 13. С. 1898—1900.
178. Steigmeier E. F., Kudman I.//Phys. Rev. 1966. Vol. 141. P. 767—774.
179. Pigon K.//Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. Chem. 1961. Vol. 9. P. 751—757.
180. Masumoto K., Komiya H.//J. Jap. Instrum. Met. 1964. Vol. 28. P. 273—279.
181. Цуркан А. Е., Максимова О. Г., Верлан В. И., Сложные полупроводники и их физические свойства. Кн-шинев: Штиница. 1971. С. 128—134.
182. Naake M. J., Belcher S. C.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 3064—3067.

183. Domingo G., Itoga R. S., Kanneur C. R.//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 536—539.
184. Марков Ю. Ф. Исследование оптических свойств полупроводниковых соединений в далекой инфракрасной области спектра. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л. ФТИ им. А. Ф. Иоффе. 1972.
185. Ehrenreich H.//Phys. Rev. 1960. V. 120. P. 1951—1954.
186. Панфилов В. В., Субботин Л. С., Верещагин Л. Ф.//Докл. АН СССР. 1971. Т. 96. С. 559—567.
187. Полупроводниковые соединения II—V групп. М.: Наука. 1978.
188. Heller M. W., Babiskin J., Radff R. L.//Phys. Rev. 1971. Vol. A36. P. 363—366.
189. Zdanowicz W., Wojakowski A.//Phys. Stat. Sol. 1966. Vol. 16. P. K129—K131.
190. Zdanowicz W., Wojakowski A.//Ibid., 1965. Vol. 8. P. 569—573.
191. Arushanov E. K., Lashul A. V., Mashovets D. V.//Phys. Stat. Sol. (b). 1980. Vol. 102. P. K121—K124.
192. Gelten M. J., Von Liehout A., van Es C., Bloot F. A. P.//J. Phys. 1978. Vol. C11. P. 227—237.
193. Slack G. A.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 143. P. 666—674.
194. Мороз А. И., Одарич В. А.//Укр. физ. журн. 1971. Т. 16. С. 1501—1504.
195. Turner W. Y., Fischler A. S., Reese W. E.//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 759—767.
196. Bloom F. A. P., Gelten M. J.//Ibid. 1979. Vol. B19. P. 2411—2419.
197. Коломиец Б. Т., Мазец Т. Ф., Сарсембинов Ш. Ш.//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 2301—2305.
198. Шутов С. О., Соболев В. В., Смешливый Л. И. Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Кишинев: Изд-во АН МССР. 1970. С. 155—163.
199. Whittett C. R., Nelson D. A.//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 3125—3134.
200. Overhof H.//Phys. Stat. Sol. 1971. Vol. 43. P. 221—228.
201. Miller K. A., Schneider J.//Phys. Lett. 1963. Vol. 4. P. 288—293.
202. Look D. C., Moore D. L.//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 3406—3412.
203. Kohler H., Fabricins A.//Phys. Stat. Sol. (b). 1975. Vol. 71. P. 487—493.
204. Bloom F. A. P.//Intern. Summ. School on Narrow-gap Semicond. Phys. and Applic. Nimes (France). 1979. P. 191—198.
205. Kawasaki T., Tanaka T.//J. Phys. Soc. Jap. 1966. Vol. 21. P. 2475—2483.
206. Eichler W., Simon G.//Phys. Stat. Sol. (b). 1978. Vol. 86. P. K85—K87.
207. Helbig R., Wagner P.//J. Phys. Chem. Sol. 1974. Vol. 35. P. 327—328.
208. Hagenberg F.//Thesis. D83. T. U. Berlin. 1980.
209. Grant F. A.//Rev. Mod. Phys. 1959. Vol. 31. P. 646—652.
210. Yu P. Y., Cardona M.//J. Phys. Chem. Sol. 1973. Vol. 34. P. 29—37.
211. Frederikse H. P. R.//J. Appl. Phys. 1961. Suppl. Vol. 32. P. 2211—2219.
212. Остин И. Р., Мотт Н. Физики о физике: Пер. с англ. М.: Знание. 1972.
213. Frederikse H. P. R.//J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 32. P. 2211—2219.
214. Кесаманлы Ф. П.//Физ. и техн. полупроводников. 1974. Т. 8. С. 225—231.
215. Kikuchi Y., Chubachi N., Iinuma K.//Sendai Symp. Acustoelectron Jpn., 1968.
216. Справочник химика. М.: Химия. 1964.
217. Spear W. E., Mort P.//Proc. Phys. Soc. 1963. Vol. 81. P. 130—137.
218. Крупишев Р. С., Абагян С. А., Давыдов А. А., Карушина А. А.//Физ. и техн. полупроводников. 1972. Т. 6. С. 75.
219. Kahan A., Lipson H. G., Loewinstein E. V.//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964. P. 1067—1071.
220. Mitra S. S., Marshall R.//Ibid. P. 1085—1090.
221. Киреев П. С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1969.
222. Zallen R. e. a.//Phys. Rev. 1970. Vol. B1. P. 4058—4064.
223. Szusukiewicz W.//Phys. Stat. Sol. (b). 1979. Vol. 91. P. 361—368.
224. Wright G. B., Strauss A. J., Harman T. C.//Phys. Rev. 1962. Vol. 125. P. 1534—1543.
225. Фистуль В. И. Сильно легированные полупроводники. М.: Наука. 1967.
226. Prince M. B.//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 1204—1213.
227. Lehoczky S. L., Broerman J. G., Nelson D. A., Whittett C. R.//Ibid. 1974. Vol. B9. P. 1598—1620.
228. Brebrick R. P., Scanlon W. W.//Ibid. 1954. Vol. 99. P. 598—608.
229. Stradling R.//Sol. Stat. Commun. 1968. Vol. 6. P. 665—673.
230. Cardona M.//Phys. III—V Compounds. Acad. Press 1966. Vol. 3. P. 125—132.
231. Stradling R. Electronic Components. Lond.: Pergamon Press. Oct. 1958. P. 1135—1142.
232. Walton A., Mishra U.//Proc. Phys. Soc. 1967. Vol. 90. P. 1111—1118.
233. Stradling R.//Phys. Lett. 1966. Vol. 20. P. 217—226.
234. Prince M. B.//Phys. Rev. 1953. Vol. 92. P. 681—687.
235. Кот М. В., Прилепов В. Д., Цуркан А. Е.//Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Кишинев: Изд-во АН МССР. 1970. С. 3—9.
236. Машковский М. В. Зарубежная электронная техника. М.: Изд. ЦНИИ «Электроника». 1974. Вып. 12. С. 3—9.
237. Kalashnikov S. G.//J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 8. P. 52—57.
238. Ewald A. W., Tuttle O. N.//Ibid. P. 523—531.
239. Иванов-Омский В. И., Коломиец Б. Т., Огородников В. К.//Физ. и техн. полупроводников. 1970. Т. 4. С. 264—268.
240. Galazka R. R.//Phys. Lett. 1970. Vol. 32A. P. 101—107.
241. Nasledow D. N., Shevchenko V. Ya.//Phys. Stat. Sol. (a) 1973. Vol. 15. P. 3—8.
242. Кристаллохимические, физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ. М.: Изд-во стандартов. 1973.
243. Гельмонт Б. Л., Иваиов-Омский В. И., Коломиец Б. Т.//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 266—269.
244. Szymanska W.//Physics Narrow Gap Semiconductors. Proc. III Intern. Conf./Warszawa, Sept. 1977. Eds. J. Raulszkewicz, M. Gorska, F. Kaczmarek. Warszawa: PWN-Polish-Sci. Publishers, 1978.
245. Dziuba Z., Wrobel J.//Phys. Stat. Sol. (b). 1980. Vol. 100. P. 379—384.
246. Redin R. D., Morrish G., Danielson G. C.//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1916—1919.
247. Kato N., Kummura M., Iwami M., Kawabe K.//Jap. J. Appl. Phys. 1977. Vol. 16. P. 1623—1627.
248. Grigas J.//Krist. Techn., 1978. Vol. 13. P. 683—686.
249. Соминский М. С. Полупроводники. Л.: Наука. 1967.

250. Stirn R. J., Becker W. M.//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 907—914.
251. Reid F. J., Willardson R. K.//J. Electron. Control. 1958. Vol. 5. P. 54—62.
252. Baars J., Jorger F.//Sol. Stat. Commun. 1972. Vol. 10. P. 875—881.
253. Hegems M., Montgomery H. C.//J. Phys. Chem. Sol. 1973. Vol. 34. P. 885—893.
254. Burstein E., Pinczuk A., Wallis R. F.//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32, Suppl. № 1. P. 251—254.
255. Rode D. L.//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C. Beers. N. Y.: Academ Press. 1975. Vol. 10.
256. Casey H. C., Ermanis F., Wolfstirn K. B.//J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 2945—2953.
257. Solomon R.//2nd Intern. Symp. GaAs and Related Compounds. 1968. Lond.: Inst. Phys. 1969. P. 11—15.
258. Roy B., Ckakaraberty B. R., Bhattacharya R., Dutta A. K.//Sol. Stat. Commun. 1978. Vol. 25. P. 937—940.
259. Wiley J. D.//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C. Beers. N. Y.: Academ. Press. 1975. Vol. 10.
260. Vilms J., Garrett J. P.//Sol. Stat. Electron. 1972. Vol. 15. P. 443—449.
261. Marshall J. M.//J. Phys. C. 1977. Vol. 10. P. 1283—1287.
262. Дахно А. Н., Емельяненко О. В., Лагунова Т. С., Метревели С. Г.//Физ. и техн. полупроводников. 1976. Т. 10. С. 677—681.
263. Голованов В. В., Метревели С. Г., Снукаев Н. В., Старосельева С. П.//Там же 1969. Т. 3. С. 120—122.
264. Stillman G. E., Wolfe C. M., Dimmock J. O.//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C. Beers. N. Y.: Acad. Press. 1977. Vol. 12. P. 169—173.
265. Трифионов В. И., Яременко Н. Г.//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 953—958.
266. Яременко Н. Г., Потапов В. Т., Ивлева В. С.//Там же. 1972. Т. 6. С. 1238—1243.
267. Rode D. L.//Phys. Rev. 1971. Vol. B3. P. 3287—3292.
268. Schein L. B.//Ibid. 1977. Vol. B15. P. 1024—1029.
269. Филиппченко А. С., Большаков Л. П.//Phys. Stat. Sol. 1976. Vol. 77. P. 53—57.
270. Лихтер А. И., Пель Е. Г., Присяжнюк С. И.//Phys. Stat. Sol. (a). 1972. Vol. 14. P. 265—275.
271. Kippermann A. H. M.//Sol. Stat. Commun. 1971. Vol. 9. P. 1825—1833.
272. Kipperman A. H. M., Van der Leeden G. A.//Ibid. 1968. Vol. 6. P. 657—666.
273. Kipperman A. H. M., Vermij C. J.//Nuovo Ciment. 1969. Vol. B63. P. 29—37.
274. Tatsuyama C., Hamaguchi C., Tomita H., Nakai J. //Jap. J. Appl. Phys. 1971. Vol. 10. P. 1698—1703.
275. Fivaz R., Mooser E.//Phys. Rev. 1969. Vol. 163. P. 743—749.
276. Fivaz R., Schmid Ph. E.//Physics and Chemistry of Materials with Layered Structures/Ed. P. A. Lee. Vol. 4. Optical and Electrical Properties. Lond.: D. Reidel Publ. Comp. 1976. P. 343—348.
277. Fisher G., Brebner J. L.//J. Phys. Chem. Sol. 1962. Vol. 23. P. 1363—1374.
278. Gousskov L., Gousskov A.//Sol. Stat. Commun. 1978. Vol. 28. P. 99—108.
279. Fielding P., Fisher G., Mooser E.//J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 8. P. 434—444.
280. Nishino T., Hamakawa Y.//Jap. J. Appl. Phys. 1977. Vol. 16. P. 1291—1299.
281. Damon R. W., Redington R. W.//Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 1498—1509.
282. Sugaike S.//Mineral J. 1957. Vol. 2. P. 63—72.
283. Itoga R. S., Kannewurf C. R.//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 1099—1108.
284. Ikari T., Hashimoto K.//Phys. Stat. Sol. (a), 1975. Vol. 31. P. K115—K117.
285. Makita Y., Kobayashi K., Kanada M., Kawai T.//J. Phys. Soc. Jap. 1968. Vol. 25. P. 816—824.
286. Kobayashi K., Kawai T., Kanada M.//Ibid. 1967. Vol. 23. P. 305—309.
287. Kawai T., Kobayashi K., Kurita M., Makita Y.//Ibid. 1971. Vol. 30. P. 1101—1105.
288. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. М.: Наука. 1979.
289. Берченко Н. Н., Крекс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. М.: Воениздат. 1982.
290. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology/Ed. O. Madelung. Berlin: Springer-Verlag. 1982. Vol. 17. Subvol. b.
291. Конуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях: Пер. с англ./Под ред. И. Б. Левинсона и Ю. К. Пожелы. М.: Мир. 1970.
292. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology/Ed. O. Madelung. Berlin: Springer-Verlag. 1982. Vol. 17. Subvol. a.
293. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology/Ed. O. Madelung, Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 17. Subvol. e.
294. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology/Ed. O. Madelung, Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 17. Subvol. f.
295. Kamath G. S.//Mater. Res. Bull. 1969. Vol. 4. P. S57—S59.
296. Van Daal H. J., Knippenberg W. F., Wascher J. D.//J. Phys. Chem. Sol. 1963. Vol. 24. P. 109—114.
297. Nimtz G., Schlicht B.//Springer Tracts in Modern Physics. Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 98.
298. Van den Dries J., Lieth R. Phys. Stat. Sol. (a). 1971. Vol. 5. P. K171—K173.
299. Stourac L., Zavetova M., Abraham A.//Proc. 12th Intern. Conf. Phys. Semicond., Stuttgart, Teubner 1974. P. 621—628.
300. Stanchev A., Vodenicharov C.//Thin Solid Films. 1976. Vol. 38. P. 67—78.
301. Asanabe S., Okazaki A.//J. Phys. Soc. Jap. 1960. Vol. 15. P. 989—993.
302. Kyriakos D. S., Valassiadis O., Economou N. A.//Instrum. Phys. Conf. 1979. Ser. 43, chapl. 8.
303. Анисимов Б. Б., Габедова А. А., Джамагидзе Ш. З.//Изв. АН СССР. Сер. неорган. матер. 1978. Т. 14. С. 1417—1422.
304. Bahl S. K., Chopra K. L.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2196—2199.
305. Yabumoto T.//J. Phys. Soc. Jap. 1958. Vol. 13. P. 972—983.
306. Albers W., Haas C., Vink H. e. a.//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2220—2225.
307. Umeda J.//J. Phys. Soc. Jap. 1961. Vol. 16. P. 124—128.
308. Maier H., Daniel D. R.//J. Electron. Mater. 1977. Vol. 6. P. 693—698.
309. Sagar A., Miller R. C.//Proc. Intern. Conf. Phys. Semicond. Exeter. July 1962/Ed. A. C. Stickland. 1962. P. 653—659.
310. Allgaier R. S., Houston B.//Phys. Rev. 1972. Vol. B5. P. 2186—2189.
311. Fonstad C. G., Rediker R. H.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. J. 2911—2923.
312. Gowers J. P., Lee P. A.//Sol. Stat. Commun. 1970. Vol. 8. P. 1447—1453.
313. Козлов С. Ф. Дис. ...докт. физ.-мат. наук. М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова. 1985.

## Глава 23

# ДИЭЛЕКТРИКИ

А. П. Генне

### 23.1. Общие сведения

Диэлектриками называют вещества, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Такое поле может длительно сохраняться лишь в средах, плохо проводящих электрический ток. Электропроводность — способность проводить электрический ток — обусловлена наличием в веществе свободных носителей заряда — электрически заряженных частиц, которые под действием внешнего электрического поля направлены перемещаются сквозь толщу материала, создавая ток проводимости (положительно заряженные носители движутся по направлению вектора напряженности электрического поля  $E$ , отрицательно заряженные — против). Параметром вещества, количественно определяющим его электропроводность, является удельная электрическая проводимость  $\gamma$ , См/м, а также удельное объемное электрическое сопротивление  $\rho = 1/\gamma$ , Ом·м, причем

$$\gamma = nqu,$$

где  $n$  — концентрация носителей заряда, м<sup>-3</sup>;  $q$  — электрический заряд носителя, Кл;  $u$  — подвижность носителя, м<sup>2</sup>/(В·с); ( $u = v/E$ , где  $v$  — скорость направленного движения носителя, м/с, в электрическом поле с напряженностью  $E$ , В/м). Носителями заряда в диэлектриках могут быть ионы, электроны и молионы — заряженные коллоидные частицы. Плотность тока проводимости (А/м<sup>2</sup>)  $j = \gamma E$ . Идеальный диэлектрик, не существующий в действительности, не содержит свободных носителей и поэтому не способен проводить электрический ток: у него  $\gamma$  и  $j$  равны нулю, а  $\rho$  бесконечно велико. У реальных диэлектриков  $\rho = 10^7 \div 10^{18}$  Ом·м, их удельная проводимость вследствие малой концентрации носителей так мала, что их считают практически не проводящими ток материалами. Между диэлектриками и полупроводниками нет точной границы, так что нижнее значение диапазона величин  $\rho$  диэлектриков условно.

Помимо удельного объемного сопротивления, для краткости обычно называемого удельным сопротивлением, применительно к твердым диэлектрикам в качестве параметра введено удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$ , Ом, имеющее важное значение при выборе материала для работы в увлажненных и загрязненных средах.

При повышении электрического напряжения, приложенного к образцу диэлектрика, он остается практически непроводящим (сохраняет высокое  $\rho$ ) до тех пор, пока под действием сил электрического поля в диэлектрике не образуется канал с высокой электропроводностью, что приводит практически к короткому замыканию между электродами, т. е. к пробое диэлектрика. Минимальное напряжение, приложенное к образцу диэлектрика и вызывающее его пробой, называют пробивным напряжением  $U_{пр}$ . Поскольку образцы одного и того же диэлектрика различной толщины пробиваются при разных напряжениях, величина  $U_{пр}$  не может характеризовать стойкость материала к пробую. Параметром диэлектрического материала, определяющим его способность противостоять пробую, является электрическая прочность  $E_{пр}$  — напряженность электрического поля в диэлектрике, при достижении которой происходит его пробой. Определяется эта характеристика так:

$$E_{пр} = U_{пр}/d,$$

где  $d$  — толщина образца диэлектрика в месте пробоя. Величину  $E_{пр}$  принято выражать в мегавольтах на метр (МВ/м). В практике электрическую прочность удобно оценивать в киловольтах на миллиметр (1 кВ/мм = 1 МВ/м).

Механизм пробоя диэлектриков может иметь различный характер. Основными видами пробоя твердых диэлектриков являются электрический и тепловой. Электрический пробой представляет собой разрушение диэлектрика силами электрического поля и сопровождается образованием электронных лавин. Тепловой пробой обусловлен нагревом диэлектрика до критической температуры вследствие диэлектрических потерь при нарушении в диэлектрике теплового равновесия. Значение  $E_{пр}$  при электрическом пробое составляет примерно 100—1000 МВ/м, а при тепловом — 1—10 МВ/м.

К электрическим параметрам диэлектриков относится диэлектрическая проницаемость, характеризующая способность материала создавать электрическую емкость. В СИ различают относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$  (прежде  $\epsilon$ ), величину безразмерную, и абсолютную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_0$ , Ф/м ( $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, по старой терминологии — диэлектрическая проницаемость вакуума, равная  $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

Диэлектрики, в силу того, что свободных носителей заряда в них мало, состоят по сути из связанных заряженных частиц: положительно заряженных ядер и окружающих их электронов в атомах, молекулах и ионах, а также упруго связанных разноименных ионов, расположенных в узлах решетки ионных кристаллов. Поляризация диэлектриков — упорядоченное смещение связанных зарядов под действием внешнего электрического поля (положительные заряды смещаются по направлению вектора напряженности поля  $E$ , а отрицательные — против него). Смещение  $l$  невелико и прекращается, когда сила электрического поля, вызывающая движение зарядов относительно друг друга, уравновешивается силой взаимодействия между ними. В результате поляризации каждая молекула или иная частица диэлектрика становится электрическим диполем — системой двух связанных одинаковых по значению и противоположных по знаку зарядов  $q$ , Кл, расположенных на расстоянии  $l$ , м, друг от друга, причем  $q$  — это либо заряд иона в узле кристаллической решетки, либо эквивалентный заряд системы всех положительных или системы всех отрицательных зарядов поляризующейся частицы. Считают, что в результате процесса поляризации в частице индуцируется электрический момент  $p = ql$ , Кл·м. У линейных диэлектриков (их большинство) между индуцируемым моментом и напряженностью электрического поля  $E$ , действующей на частицу, существует прямая пропорциональность:  $p = \alpha E$ . Коэффициент пропорциональности  $\alpha$ , Ф·м<sup>2</sup>, называют *поляризуемостью* данной частицы. Количественно интенсивность поляризации определяется поляризованностью  $P$  диэлектрика, которая равна сумме индуцированных электрических моментов всех  $N$  поляризованных частиц, находящихся в единице объема вещества:

$$P = pN \text{ или } P = \alpha NE,$$

где  $P$  — в Кл/м<sup>2</sup>;  $N$  — в м<sup>-3</sup>;  $E$  — в В/м. Следовательно, чем больше поляризуемость отдельной частицы  $\alpha$  и выше концентрация частиц  $N$ , т. е. чем больше произведение  $\alpha N$ , тем интенсивнее процесс поляризации. Из уравнения, связывающего  $P$  и  $\epsilon_r$ , следует:

$$\epsilon_r = 1 + N\alpha/\epsilon_0.$$

(Эта формула пригодна для газообразных, но в ряде случаев с большим или меньшим приближением может быть применена также для жидких и твердых диэлектриков.) Таким образом, по физическому смыслу диэлектрическая проницаемость — количественная мера интенсивности процесса поляризации диэлектриков. Концентрация  $N$  поляризующихся частиц невелика в газах и намного выше в жидких и твердых диэлектриках. Поляризуемость частицы  $\alpha$  зависит от механизма поляризации, определяемого природой диэлектрика.

Основными видами поляризации являются электронная, ионная и дипольная.

**Электронная поляризация** — упругое смещение электронных орбит относительно ядер в атомах, молекулах и ионах под действием внешнего электрического поля. Таким образом, электронная поляризация происходит во всех диэлектриках независимо от существования в них других видов поляризации. Это быстрая поляризация, совершающаяся за время порядка  $10^{-14}$ — $10^{-15}$  с, сравнимое с периодом световых колебаний. В неполярных диэлектриках существует только электронная поляризация и поэтому  $\alpha = \alpha_e$  (электронная поляризуемость). Неполярные молекулы имеют симметричное строение и поэтому центры тяжести эквивалентных положительного и отрицательного зарядов у них совпадают, так что в отсутствие внешнего поля неполярные молекулы не имеют собственного электрического момента ( $\mu = 0$ ).

**Ионная поляризация** — упругое смещение противоположно заряженных ионов в узлах кристаллической решетки ионных кристаллов под действием внешнего поля. Это тоже быстрый вид поляризации, устанавливающийся за время порядка  $10^{-12}$ — $10^{-13}$  с. Поскольку в ионных кристаллах существует еще и электронная поляризация,  $\alpha = \alpha_e + \alpha_i$  ( $\alpha_i$  — ионная поляризуемость) и такие диэлектрики отличаются большим значением  $\epsilon_r$ , чем неполярные.

Быстрые виды поляризации происходят без потерь энергии.

**Дипольная поляризация** характерна для полярных диэлектриков. Полярные молекулы имеют несимметричное строение. Центры тяжести эквивалентных разноименных зарядов у них не совпадают, и поэтому в отсутствие внешнего поля эти молекулы обладают собственным электрическим моментом  $\mu \neq 0$ , т. е. являются жесткими (постоянными) диполями. Сущность дипольной поляризации состоит в повороте (ориентации) этих жестких диполей в направлении электрического поля. Поскольку в полярной молекуле существует также и электронная поляризация,  $\alpha = \alpha_e + \alpha_d$ , где  $\alpha_d$  — дипольная поляризуемость, и поэтому полярные диэлектрики имеют  $\epsilon_r$  больше, чем неполярные. Дипольная поляризация относится к замедленным (релаксационным) видам поляризации. Для ее завершения требуется время порядка  $10^{-2}$ — $10^{-10}$  с. Поляризации релаксационного вида запаздывают во времени от изменения вызывающего их внешнего электрического поля и сопровождаются потерями энергии.

К замедленным видам относится ионно-релаксационная поляризация, происходящая в неорганических стеклах и кристаллах с неплотной упаковкой ионов, и миграционная, свойственная твердым диэлектрикам при наличии макроскопических неоднородностей.

Нелинейным диэлектрикам — сегнетоэлектрикам наряду с электронной и ионной свойственна спонтанная (самопроизвольная) поляризация, относящаяся к числу релаксационных видов. Спонтанная поляризация возникает в определенном температурном интервале, ограниченном сегнетоэлектрическими точками Кюри, под влиянием внутренних процессов самопроизвольно. При этом структура элементарной ячейки кристалла становится несимметричной, приобретая электрический момент. В пределах

небольших областей (доменов) электрические моменты соседних элементарных ячеек сориентированы параллельно, так что домен самопроизвольно весьма интенсивно поляризуется. Соседние домены поляризуются в различных направлениях, и первоначально поляризованность  $P$  образца материала в целом равна нулю. При воздействии внешнего электрического поля векторы поляризованности доменов ориентируются параллельно и весь образец оказывается интенсивно поляризованным в одном направлении. Значение  $\epsilon_r$  у сегнетоэлектриков может достигать вблизи точки Кюри до  $10^6$ .

В диэлектрике, находящемся в электрическом поле, происходит рассеяние (диссипация) энергии. Рассеиваемую за одну секунду энергию (мощность) называют *диэлектрическими потерями*. Теряемая энергия преобразуется в теплоту, вызывая нагрев диэлектрика, вследствие чего ухудшаются электрические и другие важные его характеристики. Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении, однако под диэлектрическими потерями понимают мощность, рассеиваемую в переменном электрическом поле. Вектор тока в образце диэлектрика, включенном под переменное напряжение, опережает по фазе вектор напряжения на угол  $\varphi < 90^\circ$ . Угол  $\delta$ , дополняющий  $\varphi$  до  $90^\circ$ , называют *углом диэлектрических потерь*. В идеальном диэлектрике без потерь  $\varphi = 90^\circ$  и  $\delta = 0$ . В качестве параметра диэлектрика используется  $\operatorname{tg} \delta$  — *тангенс угла диэлектрических потерь*.

Полные диэлектрические потери в образце диэлектрика емкостью  $C$ , включенном под переменное напряжение  $U$  с угловой частотой  $\omega$ ,

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

где  $P$  — в Вт;  $U$  (действующее значение) — в В;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — в Гц;  $C$  — в Ф.

Для оценки потерь в любой точке образца диэлектрика с известным значением напряженности электрического поля  $E$  удобно определять удельные диэлектрические потери:

$$p = E^2 \frac{\epsilon_r \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}},$$

где  $p$  — в Вт/м<sup>3</sup>;  $E$  — в В/м;  $f$  — в Гц. Величина  $\gamma_a = \epsilon_r \operatorname{tg} \delta / (1,8 \cdot 10^{10})$  — удельная активная проводимость диэлектрика, См/м, с параметрами  $\epsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$ , работающего на переменном напряжении при частоте  $f$ , Гц. Способность диэлектрика создавать диэлектрические потери в переменном поле характеризуется произведением  $\epsilon_r \operatorname{tg} \delta$ , называемым *коэффициентом диэлектрических потерь*.

Удельные потери диэлектрика в постоянном электрическом поле определяются только током проводимости:

$$P_{\text{пост}} = E^2 \gamma.$$

Здесь  $p_{\text{пост}}$  — в Вт/м<sup>3</sup>;  $E$  — в В/м; удельная проводимость  $\gamma$  — в См/м.

В переменном электрическом поле различают три главных вида диэлектрических потерь:

1) потери на электропроводность — возникают во всех диэлектриках;

2) релаксационные потери — обусловлены замедленными видами поляризации;

3) ионизационные потери — свойственные газообразным диэлектрикам, а также жидким и твердым при наличии в них воздушных или иных газовых включений.

Электрические параметры диэлектриков не являются физическими константами и могут зависеть от многих внешних факторов (температура, частота изменения электрического поля, влажность окружающей среды и др.).

Важное для практики значение имеют и неэлектрические свойства диэлектриков: механические, тепловые



(в том числе нагревостойкость и холодостойкость), физико-химические, радиационные и др.

В большинстве случаев практики применяются пассивные диэлектрики (электрическая изоляция, диэлектрические волноводы, электрические конденсаторы). В последнее время широкое распространение получили активные (управляемые) диэлектрики, резко изменяющие свои свойства под действием внешних (управляющих) факторов (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты и др.).

Поведение диэлектриков в электрическом поле, зависимость их характеристик от различных факторов рассмотрены в монографиях и пособиях [1—7, 9], свойства представлены в справочной литературе [9—12], методы определения электрических и неэлектрических характеристик диэлектриков — в [8, 9].

### 23.2. Газообразные диэлектрики

Газы в обычных условиях характеризуются высоким удельным сопротивлением и очень малыми диэлектрическими потерями. К достоинствам газов относятся также восстановление электроизоляционных свойств после пробоя и отсутствие старения (ухудшение свойств со временем). Недостатком их является невысокая (по сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками) электрическая прочность при нормальном давлении. Для увеличения электрической прочности используют как повышение давления газов, так и глубокое их разрежение. Повысить электрическую прочность газовой изоляции можно также, применяя электроотрицательные газы. Молекулы этих газов, содержащие обычно атомы фтора, хлора и других галогенов, способны захватывать свободные электроны и становиться малоподвижными отрицательными ионами. Удаление подвижных электронов затрудняет развитие электрического разряда, вследствие чего электрическая прочность газа возрастает.

Важнейшим для электротехнической практики газообразным диэлектриком является воздух, особенно при близких к нормальным атмосферным условиям. В табл. 23.1 приведены свойства некоторых газов в сравнении с воздухом (соответствующие параметры воздуха приняты за единицу).

Диэлектрическая проницаемость газов вследствие их малой плотности (т. е. концентрации  $N$  молекул — поляризующихся частиц) мало отличается от единицы. Значения  $\epsilon$  различных газов приведены в табл. 23.2. С ростом давления (при постоянной температуре)  $\epsilon$  газов растет ввиду увеличения концентрации поляризующихся частиц. Значения  $\epsilon$  для некоторых газов при различных давлениях приведены в табл. 23.3.

Газы в слабых электрических полях и при не очень высоких температурах обладают весьма малой удельной проводимостью. При этих условиях весьма немногочисленные свободные носители заряда — электроны и ионы — образуются лишь под действием внешних ионизаторов невысокой интенсивности — космических лучей и естественного ионизирующего излучения. Поэтому при указанных условиях газы являются отличными диэлектриками с удельным сопротивлением порядка  $10^{18}$  Ом·м, практически не имеющим диэлектрических потерь ( $\lg \delta$  порядка  $10^{-8}$ ). Повышение электропроводности газов происходит при высоких температурах, начиная с  $10^3$ — $10^4$  К, когда энергия теплового движения частиц газа велика и при столкновении они могут ионизовать друг друга (происходит термическая ионизация). Термоионизация воздуха нарастает, начиная с температуры 8000 К. При 20 000 К воздух ионизируется практически полностью [7]. Процесс термоионизации играет определяющую роль в хорошо проводящем ток канале электрической дуги, температура которого составляет 4000—15 000 К.

В основе механизма пробоя газов лежит процесс ударной ионизации, обусловленный свободными элект-

ронами, которые, будучи разогнаны в электрическом поле, ионизуют при соударении нейтральные молекулы газа. Развитие пробоя способствует также фотоионизация, обусловленная фотонами, которые испускают возбужденные при соударении с электронами молекулы газа, переходя из возбужденного состояния в нормальное.

Развитие пробоя зависит от степени однородности электрического поля, в котором происходит пробой газа. Если в однородном поле напряженность поля постоянна, а в слабонеоднородном поле изменяется вдоль силовой линии не более чем в 2—3 раза, то в резконеоднородном — на несколько порядков.

В однородном поле пробой наступает практически мгновенно по достижении определенного напряжения  $U_{пр}$ . Между электродами возникает искра, которая при достаточной мощности источника напряжения может перейти в электрическую дугу. Для газов установлен закон Пашена: при неизменной температуре пробивное напряжение газа зависит от произведения его давления  $p$  на расстояние  $d$  между электродами:  $U_{пр} = f(pd)$ . На рис. 23.1 эта зависимость представлена для воздуха и водорода. Для каждого газа характерно существование минимального значения пробивного напряжения при определенном значении  $pd$  (для воздуха 327 В при  $pd = 665$  Па·мм). Минимальное пробивное напряжение некоторых других газов, В: аргон 195; водород 280; углекислый газ 420. Если иметь в виду пробой на переменном напряжении, то приведенные данные относятся к амплитудным значениям. Как видно из рис. 23.1, при давлении, близком к нормальному (0,1 МПа), и реальных межэлектродных расстояниях произведение  $pd$  таково, что рабочая точка для воздуха находится на правой ветви кривой Пашена. Поэтому с увеличением  $p$  или  $d$   $U_{пр}$  растет, а при уменьшении их — снижается. Левая ветвь соответствует разреженным газам, так как межэлектродные расстояния порядка 0,001 мм при атмосферном давлении на практике не применяются. Для повышения  $U_{пр}$  газовых промежутков используют как повышение давления (обычно до 1,5 МПа), так и глубокое разрежение газа (вакуум). При значительном снижении давления газа (левая ветвь кривой Пашена)  $U_{пр}$  растет из-за затруднения образования газового разряда вследствие малой вероятности столкновения заряженных частиц с молекулами. Но рост не беспрерывен: при давлениях порядка  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  Па ( $10^{-3}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст.) газовый разряд переходит в вакуумный. Вакуумный же пробой обусловлен процессами на электродах, и поэтому  $U_{пр}$  в вакууме зависит от материала и состояния поверхности электродов [13, 14].

Даже в однородном поле при неизменных давлении и температуре электрическая прочность газа не остается неизменной. При малых межэлектродных расстояниях

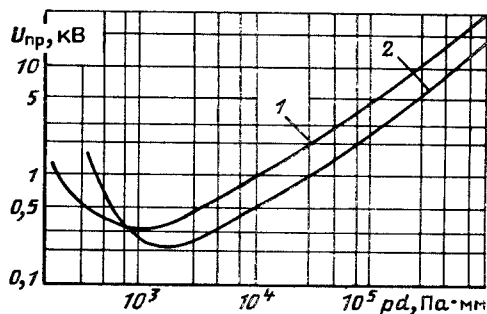


Рис. 23.1. Зависимость  $U_{пр}$  воздуха (1) и водорода (2) от произведения давления  $p$  на расстояние между электродами  $d$  [9]



из-за затруднения в образовании электронных лавин  $E_{пр}$  существенно возрастает. В табл. 23.4 приведены значения  $E_{пр}$  воздуха при нормальных условиях при изменении  $d$  в пределах от 0,006 до 1 см.

В слабонеоднородном поле, как и в однородном, пробой газового промежутка происходит сразу при возрастании приложенного напряжения до  $U_{пр}$ . Особенностью пробоя газа в резконеоднородном поле является возникновение при сравнительно низком напряжении коронного разряда (короны) в области с повышенной напряженностью электрического поля (вблизи электрода с малым радиусом кривизны), а пробой промежутка происходит при более высоком напряжении, так что пробой газа в резконеоднородном поле характеризуется двумя значениями напряжений: начальным (коронным)  $U_k$  и более высоким пробивным  $U_{пр}$ .

В неоднородном поле пробивное напряжение газа при том же расстоянии между электродами тем ниже, чем больше степень неоднородности поля. Поэтому в однородном поле  $U_{пр}$  газа максимально. Наименьшее значение  $U_{пр}$  имеет газовый промежуток между электродами стержень — плоскость, между которыми создается электрическое поле с наиболее высокой степенью неод-

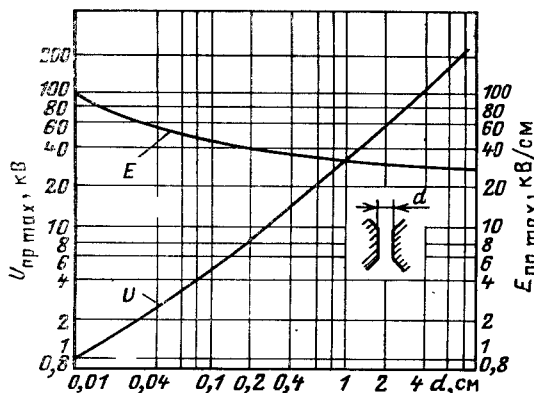


Рис. 23.2. Зависимость  $U_{пр}$  и  $E_{пр}$  (в амплитудных значениях) в однородном поле от расстояния между электродами в воздухе при частоте 50 Гц, температуре 20°C и давлении 0,1 МПа [15]

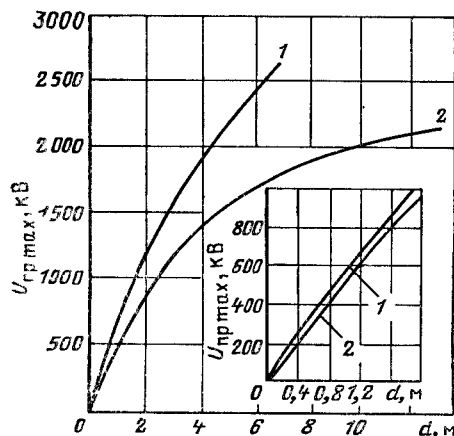


Рис. 23.3. Зависимость амплитудных значений  $U_{пр}$  воздушного промежутка от расстояния между электродами стержень—стержень (1) и стержень—плоскость (2) при частоте 50 Гц, температуре 20°C и давлении 0,1 МПа [16]

нородности. На рис. 23.2 и 23.3 приведены зависимости  $U_{пр}$  воздушного промежутка от расстояния между электродами для однородного и резконеоднородных полей.

В несимметричных электрических полях, которые создаются либо между электродами неодинаковой формы, либо между одинаковыми электродами при заземлении одного из них (при этом симметрия поля нарушается влиянием земли и других заземленных предметов), при пробое газового промежутка на постоянном напряжении характерно существенное влияние на  $U_{пр}$  полярности электродов (рис. 23.4). Этот эффект обусловлен влиянием положительного объемного заряда, образующегося вблизи электрода с меньшим радиусом кривизны (у незаземленного электрода при одинаковой их форме).

Пробой газа при высоких частотах отличается своеобразием. На рис. 23.5 приведена зависимость пробив-

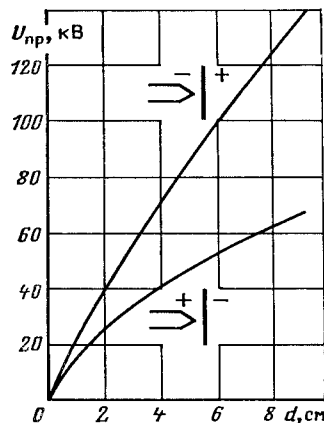


Рис. 23.4. Зависимость  $U_{пр}$  воздушного промежутка от расстояния между электродами стержень — плоскость при различной их полярности [17]

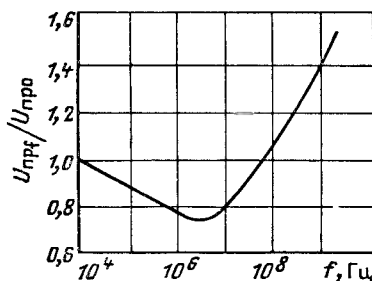
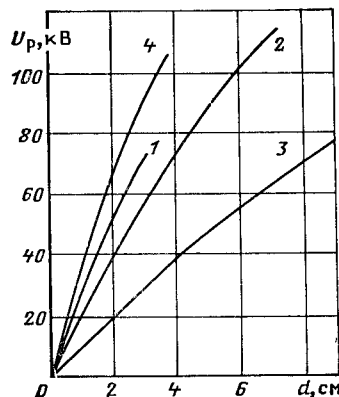


Рис. 23.5. Зависимость отношения пробивного напряжения воздуха при нормальных условиях в однородном поле от частоты  $f$  к пробивному напряжению при постоянном токе [9]

Рис. 23.6. Зависимость амплитуды разрядного напряжения в воздухе вдоль различных изоляционных цилиндров диаметром 50 мм в однородном поле при частоте 50 Гц от длины промежутка (высоты цилиндра)  $d$ : 1 — парафин; 2 — стекло; 3 — стекло при неплотном контакте с электродами; 4 — чистый воздушный промежуток [18]



ного напряжения воздуха в однородном электрическом поле при давлении 0,1 МПа от частоты (рассматривается отношение  $U_{пр}$  при частоте  $f$  к  $U_{пр}$  в постоянном электрическом поле). При частотах до  $10^4$  Гц пробивное напряжение от частоты не зависит, а с дальнейшим ростом частоты постепенно снижается, проходя через минимум в области частот  $10^6$ — $10^7$  Гц. Спад объясняется образованием в разрядном промежутке объемного заряда, облегчающего пробой. При последующем возрастании частоты  $U_{пр}$  резко увеличивается. Это обусловлено тем, что с уменьшением времени полупериода при высоких частотах для накопления электронами достаточной для ионизации молекул энергии требуется существенное увеличение приложенного напряжения.

Разряд в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика называют *поверхностным разрядом* или *поверхностным перекрытием*. Внесение твердого диэлектрика в воздушный промежуток существенно снижает его разрядное напряжение, даже если цилиндрический образец поместить между параллельными пластинами, создающими в промежутке однородное поле. Хотя в этом случае образующие цилиндра совпадают с направлением силовых линий электрического поля и поэтому поле, казалось бы, должно оставаться однородным, разряд всегда развивается в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика при более низком напряжении, чем в чисто воздушном промежутке без цилиндра из твердого диэлектрика. На рис. 23.6 приведены зависимости напряжения поверхностного разряда в воздухе вдоль изоляционных цилиндров из различных твердых диэлектриков при частоте 50 Гц от высоты цилиндра (длины разрядного промежутка). Снижение разрядного напряжения обусловлено нарушением однородности электрического поля, так как пленка влаги на поверхности диэлектрического цилиндра имеет неодинаковую толщину в различных участках вдоль длины образца, в результате чего напряжение вдоль цилиндра распределяется неравномерно. Поэтому гидрофобный (несмачивающийся) парафин в меньшей степени снижает разрядное напряжение по сравнению с чисто воздушным промежутком, чем гидрофильный (смачивающийся) фарфор или стекло. При

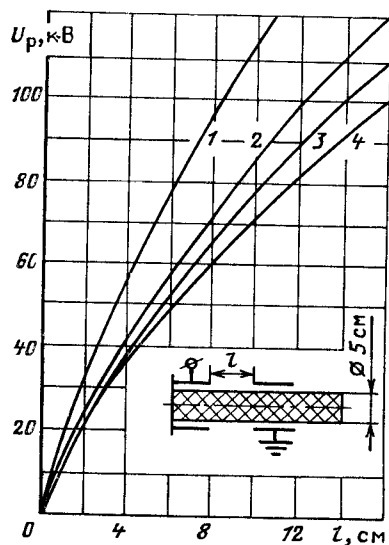


Рис. 23.7. Зависимость амплитудного разрядного напряжения в воздухе от расстояния между электродами по поверхности твердых диэлектриков в неоднородном поле при частоте 50 Гц:

1 — чисто воздушный промежуток; 2 — парафин; 3 — бакелит; 4 — фарфор и стекло [18]

тщательном просушивании гидрофильных материалов их напряжение поверхностного перекрытия можно поднять практически до разрядного напряжения чисто воздушного промежутка.

Напряжения перекрытия в неоднородном поле существенно ниже, чем в однородном, причем гигроскопические свойства твердого диэлектрика влияют меньше (рис. 23.7), так как в неоднородном поле воздействие пленки влаги на форму электрического поля не столь заметно.

Сжиженные газы обладают высокими электроизоляционными свойствами: их  $\epsilon_r$  немногим более единицы, а

Таблица 23.1. Свойства газов по отношению к свойствам воздуха [9]

| Характеристика          | Азот | Углекислый газ | Водород | Эле-газ |
|-------------------------|------|----------------|---------|---------|
| Плотность               | 0,97 | 1,52           | 0,07    | 5,19    |
| Теплопроводность        | 1,08 | 0,64           | 6,69    | 0,70    |
| Удельная теплоемкость   | 1,05 | 0,85           | 14,35   | 0,59    |
| Электрическая прочность | 1,00 | 0,90           | 0,60    | 2,3     |

Таблица 23.2. Диэлектрическая проницаемость газов при температуре 20°C и давлении 0,1 МПа при различных частотах [9]

| Газ            | $\epsilon_r$ при низких частотах | $\epsilon_r$ при длине волны 30 мм |
|----------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Гелий          | 1,000072                         | —                                  |
| Водород        | 1,00027                          | 1,00036                            |
| Кислород       | 1,00055                          | 1,00053                            |
| Аргон          | 1,00056                          | —                                  |
| Азот           | 1,00058                          | 1,00059                            |
| Углекислый газ | 1,00096                          | 1,00099                            |
| Элегаз         | 1,00191                          | —                                  |
| Воздух         | 1,00058                          | 1,00058                            |

Таблица 23.3. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  газов при различных давлениях [9]

| Газ                       | 0,1 МПа | 2 МПа  | 4 МПа  | 10 МПа |
|---------------------------|---------|--------|--------|--------|
| Воздух (при 19°C)         | 1,00058 | 1,0109 | 1,0218 | 1,0549 |
| Азот (при 20°C)           | 1,00058 | 1,0109 | —      | 1,055  |
| Углекислый газ (при 15°C) | 1,00098 | 1,020  | 1,050  | —      |

Таблица 23.4. Электрическая прочность воздуха в однородном электрическом поле при 20°C и давлении 0,1 МПа при различном межэлектродном расстоянии [2]

| $d$ , см        | 0,006 | 0,008 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,1 | 0,4 | 1,0 |
|-----------------|-------|-------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| $E_{пр}$ , МВ/м | 12,5  | 10,7  | 9,7  | 7,4  | 5,9  | 5,3  | 4,5 | 3,6 | 3,1 |

электрическая прочность составляет 30—35 МВ/м [19].  
Некоторые свойства сжиженных газов приведены в табл. 23.5.

Таблица 23.5. Свойства сжиженных газов [20]

| Характеристика                             | Азот  | Кис-<br>лород | Водо-<br>род | Неон | Гелий |
|--------------------------------------------|-------|---------------|--------------|------|-------|
| Температура кипения, К                     | 77,4  | 90,2          | 20,4         | 27,2 | 4,2   |
| Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r$ | 1,431 | 1,48          | 1,231        | —    | 1,047 |

### 23.3. Жидкие диэлектрики

Жидкости легко загрязняются и трудно очищаются. Поэтому на практике применяют технически чистые жидкие диэлектрики, содержащие примеси как попадающие извне, так и образующиеся в результате процесса старения. Такие материалы характеризуются *ионной* и *молекулярной электропроводностью*. Ионная обусловлена диссоциацией молекул самой жидкости (*собственная электропроводность*) и примесей (*примесная электропроводность*). Для неполярных жидкостей характерна примесная электропроводность. Полярные же отличаются повышенной удельной проводимостью из-за наличия обоих видов ионной электропроводности, причем возрастание  $\epsilon_r$  приводит к росту проводимости, так что сильно полярные жидкости с  $\epsilon_r$  более 20 (вода, спирты, кетоны

Таблица 23.6. Характеристики жидких органических диэлектриков [9, 10, 23]

| Характеристика                                                | Нефтяные масла        |                       |                       |                       |                       |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                               | трансформаторное      | конденсаторное        | кабельные             |                       |                       |
|                                                               |                       |                       | МН-2                  | С-220                 | П-28                  |
| Температура застывания, °С (не выше)                          | —45                   | —45                   | —45                   | —30                   | —10                   |
| Температура вспышки, °С (не ниже)                             | 135                   | 135                   | 135                   | 180                   | 240                   |
| Вязкость кинематическая при 20°C, $10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с | 17—26                 | 30—45                 | 37                    | 800                   | 2000                  |
| $\rho$ при 20°C, Ом·м                                         | $10^{11}$ — $10^{12}$ | $10^{12}$ — $10^{13}$ | $10^{12}$ — $10^{13}$ | $10^{13}$ — $10^{14}$ | $10^{11}$ — $10^{12}$ |
| $\epsilon_r$ при 20°C                                         | 2,1—2,4               | 2,1—2,3               | 2,2—2,3               | 2,1—2,2               | 2,2—2,4               |
| $\tan \delta$ при 50 Гц и 20°C                                | 0,0005—0,002          | —                     | —                     | —                     | —                     |
| То же при 100°C                                               | —                     | $\leq 0,005$          | 0,003                 | 0,003                 | 0,025                 |
| $E_{пр}$ при 50 Гц и 20°C, МВ/м                               | 12—26                 | 20—25                 | 18—20                 | 20—24                 | 14—18                 |

Продолжение табл. 23.6

| Характеристика                                                | Касторовое<br>масло | Октол               | Дибутилсебацат              | Вазелин конденса-<br>торный нефтяной |
|---------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Температура застывания, °С (не выше)                          | —15 ÷ 17            | —12                 | —8                          | $t$ каплепадения<br>37° С            |
| Температура вспышки, °С (не ниже)                             | —                   | 165                 | 180                         | —                                    |
| Вязкость кинематическая при 20°C, $10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с | 130 (при 50° С)     | 100 (при<br>100° С) | —                           | —                                    |
| $\rho$ при 20°C, Ом·м                                         | $10^8$ — $10^{11}$  | $10^{12}$           | $10^8$ — $10^9$ (при 50° С) | $10^{12}$ — $10^{13}$                |
| $\epsilon_r$ при 20°C                                         | 4,0—4,5             | 2,2—2,4             | 4,2—4,3                     | 3,8—4,0                              |
| $\tan \delta$ при 50 Гц и 20°C                                | 0,02                | 0,0012              | 0,80 (при 1 кГц<br>и 50° С) | 0,0002 (при 1 кГц)                   |
| То же при 100°C                                               | —                   | —                   | —                           | —                                    |
| $E_{пр}$ при 50 Гц и 20°C, МВ/м                               | 14—16               | 16—17               | 16                          | 20—22                                |

Примечания: 1. Дибутилсебацат применяется в конденсаторостроении. 2. Вазелин — полужидкий материал. 3. Температура вспышки — температура вспышки паров жидкости в смеси с воздухом, определяемая по стандартной методике.

Таблица 23.7. Характеристики хлорированных жидких диэлектриков [9]

| Характеристика                                                    | Трихлор-<br>дифенил | Совол            | ГХБД<br>(гексахлор-<br>бутатенин) | Трихлор-<br>бензол (ТХБ) | Совтол-10<br>(90 % сово-<br>ла + 10 %<br>ТХБ) | Гексол<br>(20 % сово-<br>ла + 80 %<br>ГХБД) |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Температура застывания, °С                                        | —18                 | 5                | —21                               | —16                      | —7                                            | —60                                         |
| Температура начала кипения при<br>0,1 МПа, °С                     | 320                 | 350              | 212                               | 215                      | 221                                           | 215                                         |
| Вязкость кинематическая при 20° С,<br>$10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с | 126                 | 1800             | 2                                 | 1,5                      | 650                                           | 4                                           |
| $\rho$ при 90° С, Ом·м                                            | $> 3 \cdot 10^9$    | $> 5 \cdot 10^9$ | $> 5 \cdot 10^{10}$               | $> 7 \cdot 10^8$         | $> 8 \cdot 10^8$                              | $> 1,3 \cdot 10^{10}$                       |
| $\epsilon_r$ при 90° С                                            | 4,5                 | 4,1              | 2,3                               | 3,3                      | 4,3                                           | 2,7                                         |
| $\tan \delta$ при 50 Гц и 90° С                                   | $< 0,025$           | $< 0,015$        | $< 0,003$                         | $< 0,150$                | $< 0,100$                                     | $< 0,010$                                   |
| $E_{пр}$ , МВ/м, не менее                                         | 20 при 65° С        | 20 при 65° С     | 20 при 20° С                      | 16 при 20° С             | 20 при 65° С                                  | 24 при 20° С                                |

Таблица 23.8. Характеристики кремнийорганических жидких диэлектриков [9, 23]

| Характеристика                                                       | ПМСЖ             |        |        | ПЭСЖ               |                  | ПМФСЖ            |                  | ПХ(Ф)ОСЖ           |       |
|----------------------------------------------------------------------|------------------|--------|--------|--------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|-------|
|                                                                      | ПМС-10           | ПМС-20 | ПМС-30 | ПЭС-Д              | № 3              | ФМ-5             | ФМ-1322          | ФС-5               | ФС-56 |
| Температура застывания, °С                                           | -60              | -50    | -60    | -60                | -70              | -110             | -70              | -100               | -90   |
| Температура вспышки, °С                                              | 170              | 180    | 200    | 150                | 125              | 200              | 200              | 200                | 30    |
| Вязкость кинематическая при 20°С, 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с | 10               | 20     | 50     | 80—180             | 15               | 15,7             | 24,5             | 18                 | 720   |
| tg δ при 20°С                                                        | 0,0008—0,0010    |        |        | 0,0003             | —                | 0,0020           | 0,0016           | 0,0200             | —     |
| ρ при 20°С, Ом·м                                                     | 10 <sup>12</sup> |        |        | 2·10 <sup>12</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>11</sup> | 10 <sup>11</sup> | 5·10 <sup>10</sup> | —     |
| ε <sub>r</sub> при 20°С                                              | 2,6—2,7          |        |        | 2,4—2,8            | —                | 2,8              | 2,7              | 5,4                | 6,3   |

Примечание. ПМСЖ — полиметилсилоксановые жидкости; ПЭСЖ — полиэтилсилоксановые жидкости; ПМФСЖ — полиметилфенилсилоксановые жидкости; ПХ(Ф)ОСЖ — полихлор(фтор)органосилоксановые жидкости.

Таблица 23.9. Характеристики фторорганических жидких диэлектриков [9, 23]

| Наименование | Температура, °С |            | E <sub>пр</sub> при 60 Гц и 25°С, МВ/м |                  | ε <sub>r</sub> при 25°С и 100 Гц | tg δ, 10 <sup>-4</sup> при 25°С и 100 Гц | ρ при 25°С, Ом·м                           |
|--------------|-----------------|------------|----------------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
|              | кипения         | замерзания | жидкости                               | пара при 0,1 МПа |                                  |                                          |                                            |
| Фреон-114    | 3,6             | -94        | 19,3                                   | 9,8              | 2,26                             | 1                                        | 10 <sup>14</sup> —10 <sup>15</sup> при 0°С |
| Фреон-113    | 47,6            | -35        | 12,2                                   | 11,0             | 2,41                             | 1                                        | 10 <sup>14</sup>                           |
| Фреон-215    | 74,0            | -80        | 12,6                                   | 12,6             | 2,76                             | 6                                        | 10 <sup>13</sup>                           |
| Фреон-212    | 92,8            | -23,8      | 12,6                                   | —                | 2,52                             | 2                                        | 10 <sup>12</sup>                           |
| Фреон-214    | 114,0           | -92,8      | 11,8                                   | 13,0             | 2,78                             | 2                                        | 10 <sup>11</sup>                           |

Таблица 23.10. Электрические характеристики жидких диэлектриков высокой степени чистоты при 20°С [22, 23]

| Название жидкостей     | ε <sub>r</sub> | E <sub>пр</sub> , МВ/м |
|------------------------|----------------|------------------------|
| n-Гексан               | 1,88           | 86,8                   |
| n-Гептан               | 1,93           | 84,0                   |
| Циклогексан            | 2,04           | 83,0                   |
| Тетрахлоруглерод       | 2,24           | 81,0                   |
| Бензол                 | 2,28           | 78,4                   |
| Толуол                 | 2,39           | 78,6                   |
| Тетрахлорэтилен        | 2,46           | 77,6                   |
| Гексахлорбутadiен      | 2,55           | 89,0                   |
| Трихлорэтилен          | 3,44           | 67,0                   |
| 1,2,4-Трихлорбензол    | 3,98           | 62,0                   |
| Диэтилэфир             | 4,38           | 58,0                   |
| Хлороформ              | 4,89           | 54,5                   |
| m-Дихлорбензол         | 4,90           | 53,8                   |
| Бромбензол             | 5,31           | 49,9                   |
| Хлорбензол             | 5,54           | 49,9                   |
| 1,1, 2,2-Тетрахлорэтан | 8,08           | 35,5                   |
| Метиленхлорид          | 8,56           | 32,5                   |
| орто-Дихлорбензол      | 9,43           | 31,2                   |
| 1,2-Дихлорэтан         | 10,03          | 27,5                   |
| Парадигид              | 15,06          | 18,2                   |

и т. п.) являются ионными полупроводниками с  $\rho = 10^8 \div 10^6$  Ом·м. Молионная электропроводность обусловлена такими носителями, как заряженные коллоидные частицы (молионы) — коллоидная вода, смолистые вещества, мыла и пр.

Примеси ухудшают и другие электрические характе-

ристики жидкостей (tg δ, E<sub>пр</sub>). Относительно менее чувствительна к примесям величина ε<sub>r</sub>. Теории пробоя жидких диэлектриков построены в зависимости от типа примесей, определяющих механизм развития пробоя [2, 21, 22].

В табл. 23.6 приведены характеристики некоторых жидких органических природных и синтетических диэлектриков. К природным относятся нефтяные масла: трансформаторное, конденсаторное и кабельные (маловязкое МН-2, С-220 средней вязкости и высоковязкое П-28), а также касторовое масло и конденсаторный вазелин; к синтетическим — полиолефиновая жидкость октол и диэфиры, к которым принадлежит дибутилсебацат. В табл. 23.7, 23.8 и 23.9 приведены характеристики синтетических жидких диэлектриков на основе хлорированных углеводородов, кремнийорганических и фторорганических соединений. Подробно свойства жидких диэлектриков рассмотрены в [9, 23—26].

Специальной физической и химической очисткой можно довести ρ неполярных жидкостей до 10<sup>16</sup>—10<sup>18</sup> Ом·м, а E<sub>пр</sub> — до 140—260 МВ/м [21]. В табл. 23.10 представлена зависимость электрической прочности E<sub>пр</sub> от ε<sub>r</sub> для высокочистых жидких диэлектриков, применяемых в качестве растворителей и для других целей.

## 23.4. Твердые диэлектрики

**Природные смолы и синтетические полимеры** (высокомолекулярные соединения) применяют для получения электроизоляционных лаков, эмалей, компаундов, пластмасс, пленочных, волокнистых и других материалов. Природные смолы и синтетические полимеры бывают термопластичные (после действия нагрева не теряют способности плавиться и растворяться в подходящих растворителях) и термореактивные (после нагрева становятся неплавкими и нерастворимыми). Синтетические полимеры получают с помощью реакций двух типов:

Таблица 23.11. Свойства природных смол при 20°C и 50 Гц [9]

| Смола    | $\rho$ , Ом · м   | $\epsilon_r$ | $\operatorname{tg} \delta$ | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м | Растворители                                             |
|----------|-------------------|--------------|----------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------|
| Шеллак   | $10^{13}-10^{14}$ | 3,5          | 0,01 (0,001*)              | 20—30                  | Этиловый спирт                                           |
| Канифоль | $10^{13}-10^{14}$ | 2,8          | 0,003                      | 10—15                  | Жидкие углеводороды, растительные масла, спирт, скипидар |
| Янтарь   | $10^{17}$         | 2,8          | 0,001                      | —                      | На холоде не растворяется                                |

\* После длительного нагрева.

Таблица 23.12. Характеристики термопластичных полимерных диэлектриков и материалов на их основе при 20 °С [10, 12, 28]

| Наименование                                              | $\rho$ , Ом · м                                     | $\epsilon_r$ | $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц                        | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------|------------------------|
| Полиэтилен                                                | $10^{15}$                                           | 2,2—2,3      | $(2-6) \cdot 10^{-4}$ при $10^6$ Гц                         | 25—60                  |
| Полипропилен                                              | $10^{14}-10^{15}$                                   | 2,2          | $(2-5) \cdot 10^{-4}$ при $10^6$ Гц                         | 25—40                  |
| Полистирол                                                | $10^{14}-10^{15}$                                   | 2,4—2,6      | $(2-8) \cdot 10^{-4}$ при $10^6$ Гц                         | 20—25                  |
| Полистирол ударопрочный                                   | $10^{13}-10^{14}$                                   | 2,6—2,7      | $(2-3) \cdot 10^{-3}$ при $10^6$ Гц                         | 23—25                  |
| Политетрафторэтилен (фторопласт-4)                        | $10^{15}-10^{18}$<br>(до 150 °С)                    | 1,9—2,2      | $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ (до $10^{10}$ Гц)                    | 25—27 при $d = 4$ мм   |
| Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3)                      | $10^{16}$                                           | 3,0          | $1,5 \cdot 10^{-2}$                                         | 13—15 при $d = 4$ мм   |
| Полivinилхлоридный пластикат изоляционный                 | $10^{10}-10^{12}$                                   | 4—8          | $(5-8) \cdot 10^{-2}$                                       | 20—50                  |
| Винипласт (жесткая пластмасса на основе поливинилхлорида) | $10^{12}-10^{14}$                                   | 4,0          | 0,02                                                        | 25—60                  |
| Полиметилметакрилат (органическое стекло, плексиглас)     | $10^{10}-10^{11}$                                   | 3,6          | 0,06                                                        | 15—25                  |
| Полиформальдегид                                          | $10^{12}-10^{13}$                                   | 3,7          | $(3-4) \cdot 10^{-3}$                                       | 25                     |
| Полиэтилентерефталат (лавсан)                             | $10^{13}-10^{14}$                                   | 3,1—3,2      | $(2-3) \cdot 10^{-3}$                                       | 140—180 (пленка)       |
| Поликарбонат (дифлон)                                     | $10^{14}-10^{15}$                                   | 3,0—3,1      | $(2-3) \cdot 10^{-3}$                                       | 20—25 (у пленки 180)   |
| Полиамиды:                                                |                                                     |              |                                                             |                        |
| капрон                                                    | $10^{11}-10^{12}$                                   | 4,5          | 0,06—0,1                                                    | 20—22                  |
| анид (нейлон)                                             | $10^{12}-10^{13}$                                   | 4,6          | 0,04                                                        | 20—25                  |
| фенилон                                                   | $10^{12}-10^{13}$                                   | 4,5          | 0,02                                                        | 18—22 (у пленки >100)  |
| Полиимид (полипиромеллитимид)                             | $10^{14}-10^{16}$<br>$10^{10}-10^{12}$ (при 250 °С) | 3,0—4,5      | $(1-5) \cdot 10^{-3}$<br>$(2-6) \cdot 10^{-3}$ (при 250 °С) | 100—300 (пленка)       |

Таблица 23.13. Свойства термореактивных электроизоляционных пластмасс при 20 °С [9—12]

| Марка пластмасс                                                                         | $\rho$ , Ом · м   | $\epsilon_r$      | $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м | Состав                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Э1-340-02; Э2-330-02;<br>Э8-361-63; Э9-342-73;<br>Э10-342-63; Э11-342-63;<br>Э15-121-02 | $10^{10}-10^{11}$ | 7,5—9,5           | 0,08                                 | 13—20                  | Связующее — новолачная и резольные фенолформальдегидные смолы (или их модификации); наполнитель — органический, минеральный, их смесь |
| Э3-340-65; Э4-100-30;<br>Э5-101-30; Э6-014-30 (высокочастотные)                         | $10^{11}-10^{12}$ | 6—8               | 0,010—0,012 при $10^6$ Гц            | 15—20                  |                                                                                                                                       |
| В1, В2, В3, В4, В5 (с повышенными электроизоляционными свойствами)                      | $10^{10}-10^{12}$ | 4—6               | 0,03—0,05                            | 12—14                  | Связующее — мочевино- и меламиноформальдегидные смолы; наполнитель — органический, минеральный, их смесь                              |
| Д1, Е1 (с повышенными дуговой стойкостью, теплостойкостью и механической прочностью)    | $10^{10}-10^{11}$ | 4—5               | 0,05—0,06                            | 5—10                   |                                                                                                                                       |
| АГ-4 (для работы в интервале температур от —196 до +200 °С и в тропических условиях)    | $10^{10}-10^{11}$ | 5—8 при $10^6$ Гц | 0,02—0,05 при $10^6$ Гц              | 13—18                  | Связующее — модифицированная фенолформальдегидная смола; наполнитель — стекловолокно                                                  |

| Марка пластмасс                                                                          | $\rho$ , Ом · м       | $\epsilon_r$ | $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м | Состав                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------|
| КМК-218; ВПМ-1; ПК-9; КФ-9; КФ-10 и др. (рабочие температуры 200—350 °С, тропикостойкие) | $10^{10}$ — $10^{13}$ | 3—6          | 0,004—0,02                           | 4—7<br>(у КФ до 20)    | Кремнийорганические смолы с минеральным наполнителем          |
| Эбонит                                                                                   | $10^{12}$ — $10^{13}$ | 2,8—3,5      | 0,004—0,013<br>при $10^6$ Гц         | 20—35                  | «Твердая резина», вулканизованная 30—35% серы                 |
| Эскапон                                                                                  | $10^{14}$ — $10^{15}$ | 2,7—2,9      | 0,0005<br>при $10^6$ Гц              | 30—35                  | Синтетический каучук СКБ, полимеризованный без вулканизаторов |

Таблица 23.14. Свойства основных видов слоистых пластиков при 20 °С [9, 29]

| Пластик                                                                          | $\rho$ , Ом · м       | $\rho_s$ , Ом         | $\epsilon_r$ | $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м | Состав                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Гетинакс низковольтный (марки I, II, III, IV, VI)                                | $10^{10}$ — $10^{11}$ | $10^{12}$             | 7—8          | 0,10—0,40                            | 20—35                  | Целлюлозная бумага — наполнитель.<br>Связующее — резольные смолы фенолформальдегидного типа и эпоксидная смола                                    |
| Гетинакс высоковольтный (V)                                                      | $10^{11}$             | $10^{13}$             | 7—8          | 0,015                                | 27—30                  |                                                                                                                                                   |
| Гетинакс высокочастотный (VII, VIII)                                             | $10^{10}$ — $10^{11}$ | $10^{12}$ — $10^{13}$ | 7—8          | 0,020—0,025<br>при $10^6$ Гц         | 28—40                  |                                                                                                                                                   |
| Текстолит низковольтный (марки А, Б, Г)                                          | $10^8$ — $10^9$       | $10^{11}$ — $10^{12}$ | 8            | <0,6                                 | 4,5—12                 | Хлопчатобумажная ткань и лавсановая (ЛТ) — наполнитель.<br>Связующее — резольные смолы фенолформальдегидного типа и эпоксиднофенольная смола (ЛТ) |
| Текстолит высокочастотный:                                                       |                       |                       |              |                                      |                        |                                                                                                                                                   |
| марки ВЧ                                                                         | $10^{10}$             | $10^{12}$             | 7—8          | 0,05 при $10^6$ Гц                   | 8—16                   |                                                                                                                                                   |
| марки ЛТ                                                                         | $10^{12}$             | $10^{13}$             | 4            | 0,03 при $10^6$ Гц                   | 25—32                  | Стеклоткань — наполнитель, связующее — фенолформальдегидные, эпоксидные и кремнийорганические смолы                                               |
| Стеклотекстолит низковольтный, рабочая температура 130 °С (марки СТ, СТ-Б, СТ-1) | $10^9$ — $10^{11}$    | $10^{11}$ — $10^{13}$ | —            | <0,4                                 | 10—25                  |                                                                                                                                                   |
| То же, рабочая температура 155 °С (марка СТ-II)                                  | $10^{11}$             | $10^{12}$ — $10^{13}$ | —            | —                                    | 12—20                  |                                                                                                                                                   |
| Стеклотекстолит с рабочей температурой 155 °С; высоковольтный (СТЭФ-1)           | $10^{11}$             | $10^{13}$             | 5—6          | 0,03—0,05                            | 20—30                  |                                                                                                                                                   |
| высоковольтный и высокочастотный (СТЭФ)                                          | $10^{11}$ — $10^{12}$ | $10^{13}$ — $10^{14}$ | 5—6          | 0,003—0,005                          | 20—30                  |                                                                                                                                                   |
| Стеклотекстолит с рабочей температурой 180 °С высоковольтный (СТК)               | $10^{12}$ — $10^{13}$ | —                     | —            | 0,001—0,005                          | 18—25                  |                                                                                                                                                   |

Таблица 23.15. Характеристики электроизоляционных компаундов при 20 °С [9—11, 30]

| Марка компаунда и тип                     | Температура размягчения, °С | Холодостойкость, °С (не выше) | Объемная усадка, % (не более) | $\rho$ , Ом · м       | $\epsilon_r$ | $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м |
|-------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------|--------------------------------------|------------------------|
| Пропиточные                               |                             |                               |                               |                       |              |                                      |                        |
| 225 (битумный)                            | 97—102                      | —25                           | 8,0—8,5                       | $10^{11}$ — $10^{12}$ | 2,8—3,2      | 0,02                                 | 20—22                  |
| КГМС-1 (полиэфирный горячего отверждения) | 250                         | —60                           | 6—7                           | $10^{11}$ — $10^{12}$ | 6            | 0,02—0,04                            | 18—22                  |
| КГМС-2 — то же, но более эластичный       | 250                         | —60                           | 8—10                          | $10^{11}$ — $10^{12}$ | 6            | 0,02—0,04                            | 18—20                  |

| Марка компаунда и тип                                    | Температура размягчения, °С | Холодостойкость, °С (не выше) | Объемная усадка, % (не более) | $\rho$ , Ом · м       | $\epsilon_r$          | $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------|
| КП-18 (полиэфирный горячего отверждения)                 | Не размягчается             | —50                           | —                             | $10^{10}$ — $10^{11}$ | 4,4—5,0 при $10^3$ Гц | 0,02—0,03 при $10^3$ Гц              | 28—33                  |
| Д1 (эпоксидный горячего отверждения)                     | То же                       | —50                           | 0,5—1                         | $10^{11}$ — $10^{12}$ | 4,0 при $10^6$ Гц     | 0,01—0,02 при $10^6$ Гц              | 28—30                  |
| К-67, К-67Ф (кремнийорганические горячего отверждения)   | » »                         | —60                           | 5—8                           | $10^{13}$ — $10^{14}$ | —                     | 0,005—0,015                          | 20—22                  |
| <i>Пропиточно-заливочные</i>                             |                             |                               |                               |                       |                       |                                      |                        |
| МБК-1 (метакриловый твердый)                             | 250                         | —60                           | 0,5                           | $10^{11}$ — $10^{12}$ | 3,1—3,5               | 0,05—0,07                            | 20—25                  |
| МБК-2 (то же менее твердый)                              | 250                         | —60                           | 0,5                           | $10^{10}$ — $10^{11}$ | 4,0—5,6               | 0,03—0,04                            | 17—20                  |
| МБК-3 (то же эластичный)                                 | 250                         | —60                           | 0,5                           | $10^{10}$ — $10^{11}$ | 4,5—5,2               | 0,03—0,04                            | 16—18                  |
| К-168 (эпоксидный холодного отверждения)                 |                             | —60                           | 0,5—1,5                       | $10^{10}$ — $10^{12}$ | —                     | 0,02—0,04                            | 25—30                  |
| К-293 (то же горячего отверждения)                       |                             | —60                           | 1—2                           | $10^{10}$ — $10^{12}$ | —                     | 0,05—0,08                            | 20—25                  |
| <i>Заливочные</i>                                        |                             |                               |                               |                       |                       |                                      |                        |
| К-30 (полиуретановый горячего отверждения)               | Не размягчается             | —80                           | 3—4                           | $10^9$ — $10^{10}$    | 6                     | 0,02—0,03                            | 27—30                  |
| К-31 (то же)                                             | То же                       | —80                           | 3—4                           | $10^{12}$ — $10^{13}$ | 5                     | 0,05—0,07                            | 27—30                  |
| Виксинт К-18 (кремнийорганический холодного отверждения) |                             | —60                           | 2—3                           | $10^{11}$ — $10^{12}$ | 3,0                   | 0,01—0,02                            | 15—18                  |
| МК-45 (маслоканифольный)                                 | 45—48                       | —8                            | 6—7                           | $10^9$ — $10^{10}$    | —                     | —                                    | 12—16                  |
| МБ-70 (битумный)                                         | 70—73                       | —10                           | 8—9                           | $10^{10}$ — $10^{11}$ | —                     | —                                    | 14—16                  |
| МБ-90 (битумный)                                         | 90—92                       | —10                           | 8—9                           | $10^{10}$ — $10^{11}$ | —                     | —                                    | 14—16                  |
| МБМ (битумно-масляный)                                   | 55—60                       | —45                           | 7—8                           | $10^{10}$ — $10^{11}$ | —                     | —                                    | 15—17                  |

Таблица 23.16. Характеристики волокнистых материалов [11]

| Вид материала                                            | Марка   | Толщина, мм | Механические характеристики | $\operatorname{tg} \delta$ (при 50 Гц)                                                                                  | Пробивное напряжение слоя, В, не менее | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м |
|----------------------------------------------------------|---------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| Бумага конденсаторная обычная                            | КОН-1   | 0,010—0,030 | Разрывная длина, м          | $\leq 0,26$ при $100^\circ\text{C}$<br>$\leq 0,32$ при $100^\circ\text{C}$                                              | 360—620<br>240—680                     | —<br>—                 |
|                                                          | КОН-2   | 0,004—0,030 | 8000<br>8500                |                                                                                                                         |                                        |                        |
| Бумага конденсаторная специальная улучшенного качества   | СКОН-1  | 0,010—0,030 | 8000                        | $\leq 0,20$ при $100^\circ\text{C}$                                                                                     | 380—620                                | —                      |
|                                                          | СКОН-2  | 0,004—0,022 | 8500                        | $\leq 0,24$ при $100^\circ\text{C}$                                                                                     | 270—590                                | —                      |
|                                                          | СКОН-3  | 0,005—0,022 | 8500                        | $\leq 0,32$ при $100^\circ\text{C}$                                                                                     | 300—610                                | —                      |
| Бумага конденсаторная с малыми диэлектрическими потерями | МКОН-08 | 0,010—0,020 | 8000                        | $\leq 0,12$ — $0,16$ при $120^\circ\text{C}$                                                                            | 320—470                                | —                      |
|                                                          | МКОН-1  | 0,008—0,030 | 8000                        | $\leq 0,16$ — $0,20$ при $120^\circ\text{C}$                                                                            | 340—620                                | —                      |
|                                                          | МКОН-2  | 0,006—0,030 | 8000                        | $\leq 0,22$ — $0,28$ при $120^\circ\text{C}$                                                                            | 300—680                                | —                      |
|                                                          | МКОН-3  | 0,006—0,015 | 8000                        | $\leq 0,26$ — $0,32$ при $120^\circ\text{C}$                                                                            | 310—520                                | —                      |
| Бумага кабельная                                         |         |             | Разрывное усилие, Н         | Не нормируется                                                                                                          | Не нормируется                         | —                      |
|                                                          | К-080   | 0,080       | 83,4                        |                                                                                                                         |                                        |                        |
|                                                          | К-120   | 0,120       | 127,5                       |                                                                                                                         |                                        |                        |
| Бумага кабельная многослойная                            | К-170   | 0,170       | 171,7                       | То же                                                                                                                   | То же                                  | —                      |
|                                                          | КМ-120  | 0,120       | 142,2                       |                                                                                                                         |                                        |                        |
| Бумага кабельная многослойная упрочненная                | КМ-170  | 0,170       | 186,4                       | «                                                                                                                       | »                                      | —                      |
|                                                          | КМП-120 | 0,120       | 152,0                       |                                                                                                                         |                                        |                        |
| Бумага кабельная высоковольтная многослойная             | КМП-170 | 0,170       | 196,2                       | $\leq 0,0022$ при $100^\circ\text{C}$<br>$\leq 0,0022$ при $100^\circ\text{C}$<br>$\leq 0,0022$ при $100^\circ\text{C}$ | »                                      | —                      |
|                                                          | КВМ-080 | 0,080       | 74                          |                                                                                                                         |                                        |                        |
|                                                          | КВМ-120 | 0,120       | 142                         |                                                                                                                         |                                        |                        |
|                                                          | КВМ-170 | 0,170       | 186                         |                                                                                                                         |                                        | —                      |

| Вид материала                                                                                      | Марка                            | Толщина, мм                                                           | Механические характеристики                                   | $\operatorname{tg} \delta$ (при 50 Гц)                                           | Пробивное напряжение слоя, В, не менее                                    | $E_{\text{пр}}$ , МВ/мм                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Бумага кабельная высоковольтная многослойная стабилизированная                                     | КВМС-080<br>КВМС-120<br>КВМС-170 | 0,080<br>0,120<br>0,170                                               | 69<br>108<br>147                                              | $\leq 0,0018$ при 100 °С<br>$\leq 0,0019$ при 100 °С<br>$\leq 0,0019$ при 100 °С | Не нормируется                                                            | —<br>—<br>—                                      |
| Бумага кабельная многослойная стабилизированная уплотненная                                        | КВМСУ-080<br>КВМСУ-120           | 0,080<br>0,120                                                        | 98<br>137                                                     | $\leq 0,0026$ при 100 °С<br>$\leq 0,0026$ при 100 °С                             | То же                                                                     | —<br>—                                           |
| Бумага телефонная                                                                                  | КТ-50                            | 0,050                                                                 | 60,8                                                          | Не нормируется                                                                   |                                                                           | —                                                |
| Бумага электроизоляционная крепированная                                                           | ЭКТМ                             | 0,44                                                                  | 44,2                                                          | То же                                                                            |                                                                           | $\geq 40$ в масле при $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$ |
| Бумага кабельная полупроводящая уплотненная одноцветная с включением в композицию сажи             | КПУ-80<br>КПУ-120                | 0,080<br>0,120                                                        | 78,4<br>117,6                                                 | $\rho = 10^3 \div 9 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$                        |                                                                           | —                                                |
| Бумага кабельная полупроводящая двухцветная уплотненная с включением сажи в композицию одного слоя | КПДУ-80<br>КПДУ-120              | 0,080<br>0,120                                                        | 94<br>127,4                                                   | $\rho_s = 5 \cdot 10^4 \div 10^6 \text{ Ом}$                                     |                                                                           | —                                                |
|                                                                                                    |                                  |                                                                       | Предел прочности при растяжении в продольном направлении, МПа |                                                                                  |                                                                           |                                                  |
| Картон электроизоляционный для работы в воздушной среде                                            | ЭВ<br>ЭВС<br>ЭВП<br>ЭВТ<br>ЭВА   | 0,10—3,0<br>0,20—0,40<br>0,10; 0,20<br>0,10—0,50<br>0,15              | 83—98<br>127<br>127<br>118<br>118                             | Не нормируется                                                                   |                                                                           | 8—12<br>12<br>12<br>12—13<br>11                  |
| Картон электроизоляционный для работы в трансформаторном масле                                     | АМ<br>А<br>Б<br>В<br>Г           | 2,0; 2,5; 3,0<br>2,0; 2,5; 3,0<br>1,0—6,0<br>2,0; 2,5; 3,0<br>0,5—3,0 | 39<br>39<br>49<br>59<br>34—39                                 | То же                                                                            | Испытательное напряжение, кВ<br>40—50<br>40—50<br>31—90<br>55—70<br>19—57 |                                                  |
| Фибра листовая электротехническая и техническая                                                    | ФЭ<br>ФТ                         | 0,4—3,0<br>0,6—25,0                                                   | 69—74<br>29—49                                                | То же                                                                            |                                                                           | $\geq 3,5$ —7,0<br>$\geq 2$ —4                   |

Примечание. Разрывная длина — длина, при которой бумага разрывается под действием собственной массы. Разрывное усилие прикладывается к полоске бумаги шириной 15 мм.

Таблица 23.17. Характеристики лакотканей [11]

| Марка лакоткани | Основа лакоткани (ткань) | Пропиточный состав | Номинальная толщина, мм      | Удельная разрывная нагрузка (по основе), Н/см | $\rho$ , Ом·м (не менее) | $U_{\text{пр}}$ , кВ                                  |                                                                                  | $\sigma$ , Н/мм² |
|-----------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------|
|                 |                          |                    |                              |                                               |                          | при 15—35 °С и относительной влажности воздуха 45—75% | после 24 ч выдержки при 20 °С при относительной влажности воздуха $(90 \pm 2)\%$ |                  |
| ЛХМ-105         | Хлопчатобумажная         | Масляный лак       | 0,15; 0,17; 0,20; 0,24; 0,30 | 38—45                                         | $10^{11}$                | 4—9,5                                                 | 1,5—4,0                                                                          | 105              |
| ЛХМС-105        | То же                    | То же              | 0,17; 0,20; 0,24             | 44—51                                         | $10^{11}$                | 4,5—7,4                                               | 1,9—3,5                                                                          | 105              |
| ЛХММ-105        | »                        | »                  | 0,17; 0,20; 0,24             | 50—64                                         | $10^{11}$                | 4,8—9,2                                               | 2,0—4,0                                                                          | 105              |



| Марка лакоткани | Основа лакоткани (ткань) | Пропиточный состав                       | Номинальная толщина, мм                       | Удельная разрывная нагрузка (по основе), Н/см | $\rho$ , Ом·м (не менее)     | U <sub>пр</sub> , кВ                                  |                                                                            | Нагревостойкость, °C |
|-----------------|--------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|                 |                          |                                          |                                               |                                               |                              | при 15—35 °C и относительной влажности воздуха 45—75% | после 24 ч выдержки при 20 °C при относительной влажности воздуха (95±2) % |                      |
| ЛХБ-105         | Хлопчатобумажная         | Битумно-масляный лак                     | 0,17; 0,20; 0,24                              | 58—80                                         | 10 <sup>11</sup>             | 4,5—9,2                                               | 2,0—3,6                                                                    | 105                  |
| ЛШМ-105         | Шелковая                 | Масляный лак                             | 0,08; 0,10; 0,12; 0,15                        | 7—24                                          | 10 <sup>11</sup>             | 2,3—8,5                                               | 1,4—3,8                                                                    | 105                  |
| ЛШМС-105        | »                        | То же                                    | 0,04; 0,05; 0,06; 0,10; 0,12                  | 11—25                                         | 10 <sup>11</sup>             | 0,4—9,3                                               | 2,0—4,2                                                                    | 105                  |
| ЛКМ-105         | Капроновая               | » »                                      | 0,10; 0,12; 0,15                              | 20—30                                         | 10 <sup>11</sup>             | 3,3—7,8                                               | 1,7—3,4                                                                    | 105                  |
| ЛКМС-105        | »                        | » «                                      | 0,10; 0,12; 0,15                              | 20—30                                         | 10 <sup>11</sup>             | 3,3—9,3                                               | 2,0—4,2                                                                    | 105                  |
| ЛСМ-105/120     | Стекланная               | » »                                      | 0,15; 0,17; 0,20; 0,24                        | 85—170                                        | 10 <sup>11</sup>             | 3,3—8,0                                               | 1,5—4,2                                                                    | 120                  |
| ЛСММ-105/120    | »                        | » »                                      | 0,17; 0,20; 0,24                              | 95—170                                        | 10 <sup>11</sup>             | 4,0—9,2                                               | 2,3—4,6                                                                    | 120                  |
| ЛСЛ-105/120     | »                        | Бутадиен-стирольный латекс               | 0,15; 0,17; 0,20                              | 95—170                                        | 10 <sup>12</sup>             | 3,2—6,8                                               | 1,3—3,0                                                                    | 120                  |
| ЛСЭ-105/130     | »                        | Эскапоновый лак                          | 0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24                  | 70—170                                        | 10 <sup>12</sup>             | 2,6—9,6                                               | 0,7—3,6                                                                    | 130                  |
| ЛСБ-120/130     | »                        | Битумно-масляно-алкидный лак             | 0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24                  | 70—170                                        | 10 <sup>12</sup>             | 2,6—10,8                                              | 0,9—4,1                                                                    | 130                  |
| ЛСП-130/155     | »                        | Полиэфирно-эпоксидный лак                | 0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17                  | 35—130                                        | 10 <sup>10</sup>             | 0,8—9,0                                               | 0,6—3,5                                                                    | 155                  |
| ЛСК-155/180     | »                        | Кремнийорганический лак                  | 0,05; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17 0,20 | 20—150                                        | 10 <sup>12</sup>             | 1,0—9,0                                               | 0,6—5,0                                                                    | 180                  |
| ЛСКР-180        | »                        | Кремнийорганическая резина               | 0,12; 0,15; 0,17; 0,20                        | 70—150                                        | 10 <sup>12</sup>             | 0,7—4,9                                               | 0,6—2,7                                                                    | 180                  |
| ЛСКЛ-155        | »                        | Кремнийорганический лак липкий           | 0,12; 0,15                                    | 70—105                                        | 10 <sup>12</sup>             | 0,8—0,9                                               | —                                                                          | 155                  |
| ЛСУ             | »                        | Полиуретановый лак                       | 0,13 0,15; 0,17                               | 90—130                                        | 10 <sup>11</sup>             | 5,5—9,5                                               | 3,0—5,5                                                                    | 155                  |
| ЛСК-2           | »                        | Кремнийорганическая эмаль                | 0,12; 0,15; 0,20                              | 50—120                                        | 10 <sup>11</sup>             | 2,5—7,5                                               | 1,3—4,2                                                                    | 180                  |
| ЛСК-5           | »                        | Полупроводящая кремнийорганическая эмаль | 0,12; 0,15; 0,20                              | 70—150                                        | $\rho_s = 10^3 \div 10^5$ Ом | —                                                     | —                                                                          | 180                  |

Таблица 23.18. Характеристики электроизоляционных слюд при 20 °C [9]

| Разновидность слюды                | Нагревостойкость, °C | $\rho$ , Ом·м                      | $\rho_s$ , Ом                      | $\epsilon_r$ | tg $\delta$  |                        | E <sub>пр</sub> , МВ/м |
|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------|------------------------|------------------------|
|                                    |                      |                                    |                                    |              | при 50 Гц    | при 10 <sup>6</sup> Гц |                        |
| Мусковит                           | 500—600              | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>14</sup> | 10 <sup>11</sup> —10 <sup>12</sup> | 6,1—8,4      | 0,0004—0,008 | 0,0001—0,0004          | 100—250                |
| Флогопит                           | 800—1000             | 10 <sup>11</sup> —10 <sup>12</sup> | 10 <sup>10</sup> —10 <sup>11</sup> | 5,5—6,7      | 0,006—0,015  | 0,0002—0,006           | 70—150                 |
| Фторфлогопит (синтетическая слюда) | 1000—1050            | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>14</sup> | 10 <sup>14</sup> —10 <sup>15</sup> | 6,1—7,5      | —            | 0,0001—0,0003          | 100—250                |

Таблица 23.19. Характеристики некоторых видов миканитов и микалекса [9—11]

| Наименование        | Марка | Виды слюды и склеивающего вещества | Толщина, мм | $\rho$ при 20 °C, Ом·м             | E <sub>пр</sub> при 20 °C, МВ/м | Нагревостойкость, °C |
|---------------------|-------|------------------------------------|-------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Миканит коллаторный | КФШ   | Флогопит обычный; шеллак           | 0,4—1,5     | 10 <sup>11</sup> —10 <sup>12</sup> | 19—22                           | 130                  |
|                     | КФГ   | То же глифталевая смола            | 0,4—1,5     | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>13</sup> | 19—22                           | 130                  |
|                     | КФП   | » ; полиэфирная смола              | 0,7—1,5     | 10 <sup>11</sup> —10 <sup>12</sup> | 19—22                           | 155                  |
|                     | КФА   | Флогопит нагревостойкий; аммофос   | 0,7—1,2     | 10 <sup>11</sup> —10 <sup>12</sup> | 19—22                           | >180                 |

| Наименование         | Марка                                | Вид слюды и склеивающего вещества                                               | Толщина, мм | $\rho$ при 20 °С, Ом · м | $E_{\text{пр}}$ при 20 °С, МВ/м | Нагревостойкость, °С |
|----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Миканит прокладочный | ПМГ<br>ПФГ<br>ПСГ<br>ПФК             | Мусковит, флогопит обычный; их смесь; глифталевая смола                         | 0,5—1,0     | $10^{11}—10^{12}$        | 16—23                           | 130                  |
|                      |                                      | Флогопит нагревостойкий, кремнийорганическая смола                              | 0,15—1,0    | $10^{10}—10^{11}$        | 16—38                           | 180                  |
| Миканит гибкий       | ГМС<br>ГФС                           | Мусковит, флогопит; масляно-глифталевый лак (светлый)                           | 0,15        | $10^{11}—10^{12}$        | 20—30                           | 130                  |
|                      | ГМЧ<br>ГФЧ                           | Мусковит, флогопит; битумно-масляный лак (черный)                               | 0,2—0,5     | $10^{11}—10^{12}$        | 20—30                           | 130                  |
|                      | ГМС-ББ<br>ГФС-ББ<br>ГМЧ-ББ<br>ГФЧ-ББ | Мусковит, флогопит; светлый и черный лаки. Миканит оклеен бумагой с двух сторон | 0,2—0,5     | $10^{11}—10^{12}$        | 16—23                           | 130                  |
|                      | ГФК                                  | Флогопит; кремнийорганический лак                                               | 0,2—0,5     | $10^{11}—10^{12}$        | 19—25                           | 180                  |
|                      |                                      |                                                                                 |             |                          |                                 |                      |
| Микалес              |                                      | Порошок слюды мусковит — наполнитель, легкоплавкое стекло — связующее           | 4—15        | $10^{10}—10^{12}$        | 13—18                           | 300—350              |

Таблица 23.20. Характеристики некоторых видов слюдинитов и слюдопластов [9—11]

| Наименование            | Марка                                   | Вид склеивающего материала, подложки                                                                          | Толщина, мм             | $\rho$ при 20 °С, Ом · м               | $E_{\text{пр}}$ , МВ/м | Нагревостойкость, °С |
|-------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Слюдинит коллекторный   | КСШ                                     | Шеллак                                                                                                        | 0,45—1,2                | $10^{10}—10^{12}$                      | 28—35                  | 130                  |
| Слюдинит гибкий         | ГСП<br>Г <sub>1</sub> СП                | Полиэфирный лак<br>То же; стеклоподложка с одной стороны                                                      | 0,15—0,30<br>0,10, 0,15 | $10^{11}—10^{12}$<br>$10^{11}—10^{12}$ | 17—23<br>20—22         | 130<br>130           |
|                         | Г <sub>2</sub> СП                       | То же; стеклоподложки с двух сторон                                                                           | 0,2—0,3                 | $10^{11}—10^{12}$                      | 28—30                  | 130                  |
|                         | ГСП-ПЛ-10                               | Полиэфирный лак; полиэтилентерефталатная пленка толщиной 10 мкм с одной стороны                               | 0,15; 0,20              | $10^{11}—10^{12}$                      | 30—32                  | 130                  |
|                         | ГСП-ПЛ-20                               | То же, 20 мкм                                                                                                 | 0,20; 0,25              | $10^{11}—10^{12}$                      | 28—30                  | 130                  |
|                         | ГСП-ПЛ-50                               | То же, 50 мкм                                                                                                 | 0,25; 0,30              | $10^{11}—10^{12}$                      | 26—28                  | 130                  |
|                         | Г <sub>1</sub> СК                       | Кремнийорганический лак; стеклоподложка с одной стороны                                                       | 0,10; 0,15              | $10^{11}—10^{12}$                      | 20—22                  | 155                  |
|                         | Г <sub>2</sub> СК<br>Г <sub>1</sub> СКН | То же, стеклоподложки с двух сторон<br>Кремнийорганический лак нагревостойкий; стеклоподложка с одной стороны | 0,2—0,3<br>0,10; 0,15   | $10^{11}—10^{12}$<br>$10^{11}—10^{12}$ | 28—30<br>20—32         | 155<br>300           |
|                         | Г <sub>2</sub> СКН                      | То же; стеклоподложки с двух сторон                                                                           | 0,2—0,3                 | $10^{11}—10^{12}$                      | 26—28                  | 300                  |
| Слюдопласт коллекторный | КИФШ                                    | Шеллак                                                                                                        | 0,4—1,5                 | $10^{10}—10^{11}$                      | 22—26                  | 130                  |
|                         | КИФП                                    | Полиэфирная смола                                                                                             | 0,4—1,5                 | $10^{10}—10^{11}$                      | 22—24                  | 155                  |
|                         | КИФН-С                                  | Нагревостойкое связующее                                                                                      | 0,4—1,5                 | $10^{11}—10^{12}$                      | 24—26                  | >180                 |
|                         | КИФК                                    | Кремнийорганическая смола                                                                                     | 0,4—1,5                 | $10^{11}—10^{12}$                      | 24—26                  | >180                 |
| Слюдопласт прокладочный | ПИФШ                                    | Шеллак                                                                                                        | 0,5—1,5                 | $10^{11}—10^{12}$                      | 20—28                  | 130                  |
|                         | ПИФША                                   | »                                                                                                             | 0,5—1,5                 | $10^{11}—10^{12}$                      | 20—28                  | 130                  |
|                         | ПИФТ                                    | Алюмофосфат с кремнийорганическим лаком                                                                       | 0,5—1,5                 | $10^{11}—10^{12}$                      | 20—28                  | >180                 |

| Наименование                       | Марка                                | Вид склеиваемого материала, подложки                                                                 | Толщина, мм | $\rho$ при 20 °С, Ом · м | $E_{пр}$ , МВ/м | Нагревостойкость, °С |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------|-----------------|----------------------|
| Слюдопласт композиционный (гибкий) | ГИТ-ТС                               | Триэтиленглифталевый или глифта-<br>левый лак; подложки из стекло-<br>ткани и стеклосетки            | 0,25; 0,30  | $10^{11}-10^{12}$        | 10—19           | 130                  |
|                                    | ГИП-ТС<br>ГИП-СС<br>ГИК-ТС<br>ГИК-СС | Полиэфирный лак; подложки из стек-<br>лоткани и стеклосетки или обе<br>подложки из стеклосетки       | 0,35—0,45   | $10^{11}-10^{12}$        | 10—19           | 155                  |
|                                    |                                      | Кремнийорганический лак; подложки<br>из стеклоткани и стеклосетки или<br>обе подложки из стеклосетки | 0,35—0,45   | $10^{11}-10^{12}$        | 9—18            | 180                  |

Таблица 23.21. Свойства электротехнических кварцевых стекол [9]

| Характеристика                                                                  | Вид стекла          |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
|                                                                                 | Прозрач-<br>ное     | Непро-<br>зрачное |
| Средний ТК линейного расширения, °С <sup>-1</sup> , в интервале температур, °С: |                     |                   |
| 20—50                                                                           | $4,0 \cdot 10^{-7}$ | —                 |
| 120—420                                                                         | $6,0 \cdot 10^{-7}$ | —                 |
| 420—1200                                                                        | $5,0 \cdot 10^{-7}$ | —                 |
| $\rho$ , Ом · м, при $t$ , °С:                                                  |                     |                   |
| 20                                                                              | $10^{14}$           | $10^{13}$         |
| 200                                                                             | $10^{12}$           | $10^{10}$         |
| 600                                                                             | —                   | $10^4$            |
| 1000                                                                            | $10^6$              | $10^2$            |
| $\epsilon_r$                                                                    | 3,8                 | 3,7               |
| $\text{tg } \delta$ , $10^{-4}$ , при $10^{10}$ Гц и 20 °С                      | 1,0                 | 3,0               |
| То же при 1000 °С                                                               | 5,0                 | —                 |
| $E_{пр}$ , МВ/м, при $t$ , °С:                                                  |                     |                   |
| 20                                                                              | 44                  | 32                |
| 200                                                                             | 32                  | 21                |
| 600                                                                             | 6                   | 3                 |

Таблица 23.22. Свойства некоторых электроизоляционных стекол [9]

| Марка<br>стекла | Средний ТК<br>линейного<br>расширения<br>в интервале<br>20—300 °С,<br>$10^{-7}$ °С <sup>-1</sup> | $\epsilon_r$ при 20 °С |                     | $\text{tg } \delta$ , $10^{-4}$ ,<br>при 20 °С |                     | $\rho$ , Ом · м   |                  |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------|------------------------------------------------|---------------------|-------------------|------------------|
|                 |                                                                                                  | при<br>$10^6$ Гц       | при<br>$10^{10}$ Гц | при<br>$10^6$ Гц                               | при<br>$10^{10}$ Гц | при<br>150 °С     | при<br>300 °С    |
|                 |                                                                                                  |                        |                     |                                                |                     |                   |                  |
| C5-1            | 5                                                                                                | 3,81                   | 3,80                | 1                                              | 1                   | —                 | —                |
| C40-1           | $40,0 \pm 1,5$                                                                                   | 5,10                   | 4,70                | 22                                             | 53                  | —                 | —                |
| C48-1           | $48,0 \pm 1$                                                                                     | 5,40                   | 4,90                | 22                                             | 65                  | —                 | —                |
| C87-1           | $87,0 \pm 1$                                                                                     | 7,20                   | 6,80                | 13                                             | 62                  | —                 | —                |
| C63-1           | $63,0 \pm 2$                                                                                     | 14,0                   | 12,0                | 18                                             | 131                 | $3 \cdot 10^{11}$ | $6,2 \cdot 10^7$ |
| C77-1           | $77,0 \pm 2$                                                                                     | 13,0                   | 11,0                | 12                                             | 78                  | $9 \cdot 10^{11}$ | $6,3 \cdot 10^7$ |

Таблица 23.23. Свойства некоторых марок технических ситаллов [9]

| Марка ситалла        | Средний ТК линейно-<br>го расширения<br>в интервале<br>300—400 °С, $10^{-7}$ °С <sup>-1</sup> | $\epsilon_r$ при 25 °С |                     | $\text{tg } \delta$ , $10^{-4}$ при 25 °С |                     | $\rho$ , Ом · м     | $\rho_s$ , Ом        | $E_{пр}$ ,<br>МВ/м |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
|                      |                                                                                               | при<br>$10^6$ Гц       | при<br>$10^{10}$ Гц | при<br>$10^6$ Гц                          | при<br>$10^{10}$ Гц |                     |                      |                    |
| C-15-12 (СТЛ-1)      | 1,2                                                                                           | 9,7                    | —                   | 461                                       | —                   | $2,2 \cdot 10^{10}$ | $1,8 \cdot 10^{11}$  | 70,7               |
| C-12-14 (СТЛ-5)      | 7,0                                                                                           | 7,4                    | 7,05                | 32                                        | 153                 | $4,1 \cdot 10^{11}$ | $1,9 \cdot 10^{12}$  | 27,0               |
| ТС-81 (СТЛ-8)        | 17                                                                                            | 7,0                    | 6,42                | 41                                        | 64                  | $3,3 \cdot 10^{10}$ | $2,35 \cdot 10^{11}$ | 29,6               |
| АС-05-С-023 (СТЛ-10) | 120                                                                                           | 5,7                    | 5,40                | 21                                        | 120                 | $4,6 \cdot 10^{10}$ | $1,15 \cdot 10^{11}$ | 85,3               |
| СТ-50-1 (СТМ-2)      | 50                                                                                            | 8,3                    | 7,90                | 15                                        | 45                  | $7,1 \cdot 10^{10}$ | $4,56 \cdot 10^{11}$ | 47,2               |
| СТ-50-2 (СТМ-3)      | 50                                                                                            | 5,6                    | 5,50                | 200                                       | 5                   | $3,2 \cdot 10^{10}$ | $1,67 \cdot 10^{11}$ | 27,9               |
| АС-05-336 (СТБ-2)    | 48                                                                                            | 5,1                    | 4,96                | 10                                        | 17                  | $4,9 \cdot 10^{10}$ | $1,04 \cdot 10^{12}$ | 65,9               |

Таблица 23.24. Основные характеристики электрокерамических материалов [10]

| Материал                      | Плот-<br>ность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Механические характеристики                        |                                                         |                                                        | ТК линей-<br>ного рас-<br>ширения,<br>$10^{-6}$ °С <sup>-1</sup> | Электрические характеристики при 20 °С |              |                                  |                    |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------------|
|                               |                                      | Предел<br>прочности<br>при растя-<br>жении,<br>МПа | Предел проч-<br>ности при<br>статическом<br>изгибе, МПа | Удельная<br>ударная<br>вязкость,<br>кДж/м <sup>2</sup> |                                                                  | $\rho$ , Ом · м                        | $\epsilon_r$ | $\text{tg } \delta$<br>при 50 Гц | $E_{пр}$ ,<br>МВ/м |
| Электрофарфор                 | 2200                                 | 30—55                                              | 60—110                                                  | 1,8—2,2                                                | 3,5—5,0                                                          | $10^{11}-10^{12}$                      | 5—8          | 0,022—0,025                      | 30—32              |
| Ультрафарфор УФ-46<br>и УФ-43 | 3200                                 | 50—60                                              | 200—250                                                 | 2,5—2,8                                                | 5,0—5,5                                                          | $10^{12}-10^{13}$                      | 8,0—8,8      | 0,0005—0,001                     | 30—36              |
| Стеатит СК-4, ТК-21           | 3000                                 | 60—70                                              | 170—190                                                 | 3,0—3,5                                                | 6,0—6,4                                                          | $10^{13}-10^{14}$                      | 6,5—7,0      | 0,001—0,003                      | 40—42              |
| Кордиерит                     | 2800                                 | —                                                  | 70—88                                                   | 2,0—3,0                                                | 2,0—2,3                                                          | $10^9-10^{10}$                         | 5—6          | —                                | 4,5—6,0            |

Примечание. Механические характеристики относятся к неглазурованным образцам. У глазурированного фарфора и стеатита характеристики выше на 15—20%. Значения ТК расширения даны для интервала температур 20—100 °С.

полимеризации и поликонденсации. Некоторые полимеры последнего типа по аналогии с природными материалами также называют смолами (например, фенолформальдегидные смолы, полнэфирные, эпоксидные). В трехтомной энциклопедии полимеров представлены подробные сведения по всем разделам химии, физики и технологии полимеров и полимерных материалов (пластмасс, каучуков и резин, химических волокон, пленочных материалов, лаков, красок и др.) [27]. Свойства природных смол приведены в табл. 23.11.

**Пластмассы** — композиционные материалы, основой которых являются полимеры, определяющие главные свойства и выполняющие роль связующего, соединяющего все компоненты материала в монолит. Остальные компоненты — наполнители, пластификаторы, стабилизаторы и другие — при введении в неполярные полимеры снижают их электронизоляционные свойства. Поэтому пластмассы на основе таких полимеров — отличных диэлектриков — состоят практически только из связующего. В табл. 23.12 приведены свойства термопластичных полимерных органических диэлектриков и материалов на их основе, в табл. 23.13 — свойства термореактивных пластмасс, а в табл. 23.14 — слоистых пластиков с листовым (рулонным) наполнителем.

**Электронизоляционные компаунды (составы)** — твердые материалы. При технологическом применении (пропитке, заливке) находятся в жидком состоянии. В рабочем состоянии они тверды. Их свойства приведены в табл. 23.15.

**Свойства волокнистых материалов** — бумаг (в том числе полупроводящей), картона и фибры указаны в табл. 23.16, а локотканей (и полупроводящей тоже) — в табл. 23.17.

**Слюда** — неорганический диэлектрик. В табл. 23.18 приведены свойства важнейших видов слюды. Миканиты — клееные листовые материалы на основе слюды, которые могут иметь и волокнистые подложки. В табл. 23.19 приведены свойства некоторых видов миканитов и микалеса (пластмассы на основе слюды). Замена миканитов являются материалы из слюдяных бумаг — слюдиниты и слюдопласты; свойства некоторых их видов приведены в табл. 23.20. Слюдянистая бумага получается из отходов слюды мусковит, а слюдопластовая — из отходов слюды флогопит.

**Стекла** — неорганические аморфные вещества, представляющие собой обычно системы различных оксидов. В табл. 23.21 указаны свойства кварцевых стекол, а в табл. 23.22 — ряда других электроизоляционных стекол.

**Ситаллы** — стеклокристаллические материалы, получаемые путем кристаллизации стекол специального состава. Свойства технических ситаллов некоторых марок даны в табл. 23.23.

**Электротехническая керамика** — камнеподобный материал, получаемый спеканием массы заданного состава и состоящий из кристаллической и аморфной фаз. Свойства распространенных электрокерамических материалов приведены в табл. 23.24.

### 23.5. Активные диэлектрики

**Сегнетоэлектриками** называют диэлектрики, обладающие в определенном температурном диапазоне спонтанной поляризацией. К своеобразным свойствам сегнетоэлектриков относятся: высокое и сверхвысокое значение  $\epsilon_r$ ; резкая зависимость  $\epsilon_r$  от температуры с острыми пиками в точке Кюри; резкая зависимость  $\epsilon_r$  от напряженности электрического поля. Эти свойства используются в устройствах на основе сегнетокерамических материалов. На рис. 23.8 приведена зависимость  $\epsilon_r$  титаната бария от температуры, откуда видно, что при 125 °С у этого материала существует точка Кюри. На рис. 23.9 для этого же материала показана зависимость  $\epsilon_r$  от напряженности

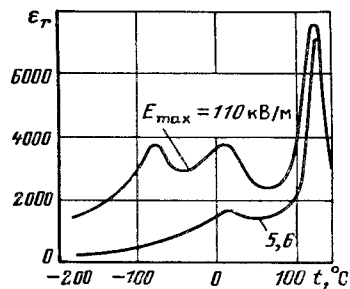


Рис. 23.8. Зависимость  $\epsilon_r$  титаната бария от температуры при различной напряженности электрического поля [32]

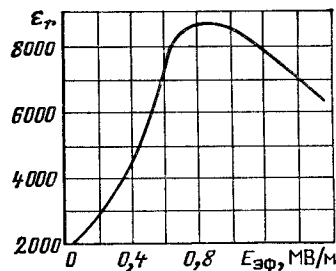


Рис. 23.9. Зависимость  $\epsilon_r$  титаната бария от напряженности электрического поля при температуре 22 °С [32]

электрического поля  $E_{эф}$ . На основе сегнетокерамики созданы вариконды — нелинейные диэлектрические конденсаторы, емкость которых резко изменяется при изменении воздействующих на них переменных и постоянных электрических напряжений. Свойства сегнетокерамики для варикондов приведены в табл. 23.25. Основными характеристиками варикондов являются: точка Кюри  $T_C$ ;  $\epsilon_n$  — начальная диэлектрическая проницаемость в слабом переменном электрическом поле (2—5 кВ/м); коэффициент нелинейности по переменному полю  $K \sim \epsilon_{max}/\epsilon_n$ , где  $\epsilon_{max}$  — максимальное значение диэлектрической проницаемости в переменном поле (при  $E = E_{max}$ ); коэффициент реверсивной нелинейности по постоянному полю  $K_{\sim} \sim \epsilon_{\sim}/\epsilon_{min}$ , где  $\epsilon_{\sim}$  — диэлектрическая проницаемость в переменном поле при отсутствии смещающего постоянного поля,  $\epsilon_{min}$  — диэлектрическая проницаемость при том же переменном поле и значительном смещающем постоянном поле, когда  $\epsilon$  уже практически не зависит от смещающего поля.

**Пьезоэлектрики** — кристаллические диэлектрики, не имеющие центра симметрии, в которых под действием механических напряжений возникает электрическая поляризация (прямой пьезоэлектрический эффект), а под действием внешнего электрического поля — механическая деформация (обратный пьезоэлектрический эффект). Таким образом, с помощью пьезоэлектриков можно преобразовывать электрические сигналы в механические и наоборот. Между поверхностной плотностью заряда  $q$ , образующегося при прямом пьезоэффекте на поверхности поляризованного кристалла, и механическим напряжением  $\sigma$  существует прямо пропорциональная зависимость  $q = d\sigma$ , причем знаки зарядов на электродах пьезоэлемента зависят от направления механических напряжений (сжатие — растяжение). Механическая деформация  $u$  в такой же зависимости находится с напряженностью внешнего электрического поля  $E$  при обратном пьезоэффекте:  $u = dE$ , а характер деформации (сжатие или растяже-

ние) определяется направлением поля (поляриностью направления, приложенного к электродам пьезоэлемента).

Коэффициент  $d$  (пьезомодуль) у одного и того же диэлектрика одинаков как для прямого, так и для обратного пьезоэффекта. В качестве пьезоэлектрических применяются материалы с ярко выраженными пьезосвойствами: пьезоэлектрические монокристаллы и пьезокерамика. Обычная сегнетокерамика как изотропная среда не обладает пьезосвойствами. Для придания этих свойств сегнетокерамике поляризуют: выдерживают в нагретом состоянии в сильном постоянном электрическом поле [33, 34]. В итоге векторы спонтанной поляризованности доменов внешним полем ориентируются, из изотропного тела керамика превращается в анизотропное, обладающее устойчивой остаточной поляризованностью  $P_0$ , направление которой определено поляризующим полем. Это приводит к появлению пьезоэффекта.

Помимо пьезомодуля, значение которого зависит от кристаллографического направления, для оценки пьезоэлементов применяют коэффициент электромеханической связи  $K$ , характеризующий эффективность преобразования механической энергии в электрическую и наоборот (при прямом и обратном пьезоэффекте), а также механическую добротность  $Q_M$ , определяемую потерями на внутреннее трение в материале, от значения которой существенно зависит увеличение амплитуды колебаний элемента при резонансной частоте. Работоспособность пьезоматериалов определяется также значениями  $\epsilon_r$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  и точкой Кюри  $T_C$ .

Пьезокерамические материалы в зависимости от назначения делят на четыре класса.

Материалы класса I применяют для высокочувствительных пьезоэлементов, в частности, в режиме слабых сигналов, когда определяющим параметром является пьезомодуль.

Материалы класса II предназначены для применения в условиях сильных электрических полей и высоких механических напряжений. Дополнительным требованием здесь является малый  $\operatorname{tg} \delta$  и высокая механическая добротность  $Q_M$ .

Материалы класса III применяют для пьезоэлементов с повышенной стабильностью резонансных частот во времени и с изменением температуры, с высокой механической добротностью  $Q_M$ .

К классу IV относят материалы для высокотемпературных пьезоэлементов (с  $T_C$  выше 300 °C).

В табл. 23.26 приведены параметры некоторых промышленных пьезокерамических материалов. Их подразделяют на три типа:

Тип А. Материалы системы титаната бария (ТБ-1, ТБК-3, ТБКС).

Тип Б. Материалы системы цирконата-титаната свинца (ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-22, ЦТС-23, ЦТС-24, ЦТС-300).

Тип В. Материалы ниобатной системы [НБС-1, НБС-3,  $(K_{0,5}Na_{0,5})NbO_3$ ].

Пьезомодуль измеряется в пКл/Н (1 пКл =  $10^{-12}$  Кл). Если направление остаточной поляризации  $P_0$  принять за ось 3, то пьезоэффект вдоль этой оси характеризуется пьезомодулем  $d_{33}$  при сжатии - растяжении материала вдоль оси 3, а пьезомодулем  $d_{31}$  — при деформации в перпендикулярной плоскости.

Вследствие высоких значений  $\epsilon_r$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  и малой  $Q_M$  пьезокерамику нецелесообразно использовать на частотах выше 10 МГц. На ВЧ и СВЧ применяют монокристаллические пьезоэлектрики, причем наиболее часто — кварц. Кристалл кварца — шестигранная призма, увенчанная двумя пирамидами (рис. 23.10). Для оценки свойств кварца используют прямоугольную систему координат. При этом оптическая

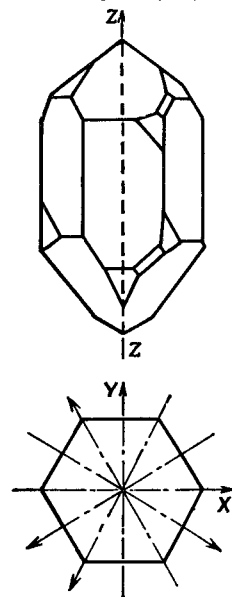


Рис. 23.10. Кристалл правого кварца и его оси [19]

Таблица 23.25. Свойства сегнетокерамики для варикондов [20, 31]

| Материал | $T_C$ , °C | $\epsilon_n$ при 20 °C | $K \sim$ | $E_{\max}$ , кВ/м | $K_{-}$  | $\operatorname{tg} \delta$ при 20 °C |
|----------|------------|------------------------|----------|-------------------|----------|--------------------------------------|
| ВК-1     | 75         | 2300—2500              | 6—8      | 150—200           | $\geq 2$ | 0,02                                 |
| ВК-2     | 75         | 2000—2500              | 15—20    | 120—150           | $\geq 2$ | 0,01                                 |
| ВК-3     | 25         | 10 000—20 000          | 1—2      | 50—100            | $\geq 8$ | 0,03                                 |
| ВК-4     | 105        | 1800—2000              | 10—16    | 250—300           | $\geq 2$ | 0,015                                |
| ВК-5     | 25         | 2000—3000              | 35—50    | 80—100            | $\geq 2$ | 0,01                                 |
| ВК-6     | 200        | 400—500                | 20—50    | 500—600           | —        | 0,03                                 |
| ВК-7     | <20        | 2000—4000              | —        | —                 | $\geq 2$ | 0,001                                |

Таблица 23.26. Характеристики промышленных пьезокерамических материалов [20]

| Марка материала          | Класс | $T_C$ , °C | $\epsilon_r$ | $\operatorname{tg} \delta$ | Пьезомодули, пКл/Н |          | $K$      | $Q_M$      |
|--------------------------|-------|------------|--------------|----------------------------|--------------------|----------|----------|------------|
|                          |       |            |              |                            | $-d_{31}$          | $d_{33}$ |          |            |
| ТБ-1                     | I     | 120        | 1400         | 0,01                       | 45—78              | 100—190  | 0,2—0,36 | 100—300    |
| ТБК-3                    | II    | 105        | 1200         | 0,02                       | 43                 | 77       | 0,25     | $\geq 300$ |
| ТБКС                     | III   | 160        | 450          | 0,002                      | 27                 | 77       | 0,25     | $\geq 350$ |
| ЦТС-19                   | I     | 290        | 1400         | 0,03                       | 119                | 282      | 0,47     | 70         |
| ЦТС-21                   | IV    | 410        | 550          | 0,02                       | 27                 | 67       | 0,20     | 100        |
| ЦТС-22                   | III   | 330        | 800          | 0,02                       | 50                 | 100      | 0,20     | $\geq 400$ |
| ЦТС-23                   | II    | 280        | 1050         | 0,007                      | 100                | 200      | 0,43     | $\geq 200$ |
| ЦТС-24                   | II    | 280        | 1050         | 0,007                      | 100                | 200      | 0,45     | $\geq 200$ |
| ЦТС-300                  | III   | 330        | 1100         | 0,003                      | 95                 | 280      | 0,43     | 500        |
| НБС-1                    | II    | 265        | 1600         | $\leq 0,02$                | 67                 | 167      | 0,28     | 150        |
| НБС-3                    | III   | 270        | 1800         | 0,025                      | 40                 | 100      | 0,20     | $\geq 300$ |
| $(K_{0,5}Na_{0,5})NbO_3$ | IV    | 420        | 420          | 0,013                      | 49                 | 160      | 0,45     | 240        |

ось  $Z$  проходит вдоль кристалла через вершины пирамид. Три оси  $X$ , называемые электрическими, проходят через вершины шестиугольника в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$ . Три оси  $Y$ , проходящие перпендикулярно сторонам того же шестиугольника, называются механическими.

Кристаллы кварца отличаются очень высокой механической добротностью ( $5 \cdot 10^4$ — $10^7$  и выше у синтетических кристаллов) и малыми значениями  $\operatorname{tg} \delta$  (не более  $2 \cdot 10^{-4}$ ) и  $\epsilon_r$  (4,52—4,63), что обеспечивает работоспособность пьезоэлементов на высоких частотах, хотя пьезомодули кварца невелики ( $d_{11}=2,31$  пКл/Н,  $d_{14}=0,7$  пКл/Н). Значение коэффициента электромеханической связи  $K$  у кварца невелико и составляет только 0,1. Пьезомодуль  $d_{11}$  определяет поляризацию вдоль оси  $X$  при деформации вдоль этой оси, а  $d_{14}$  — при деформации сдвига в плоскости, перпендикулярной оси  $X$ .

Наиболее широкое применение находят пластины косых срезов кристалла кварца, отличающиеся термостабильностью частоты механических колебаний и другими полезными свойствами [9, 20].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканиви Г. И. Физика диэлектриков (область слабых полей). М.: Гостехиздат, 1949.
2. Сканиви Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Физматгиз, 1958.
3. Теория диэлектриков/Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Тареев. М.: Энергия, 1965.
4. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков. Киев: Вища школа, 1980.
5. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982.
6. Бёнинг П. Электрическая прочность изоляционных материалов и конструкций: Пер. с нем./Под ред. А. А. Воробьева. М.: Госэнергоиздат, 1960.
7. Техника высоких напряжений/Г. Н. Александров, В. Л. Иванов, К. П. Кадомская и др./Под ред. М. В. Костенко. М.: Высшая школа, 1973.
8. Казариовский Д. М., Тареев Б. М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий. — 3-е изд. Л.: Энергия, 1980.
9. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — 2-е изд. М.: Энергия. Т. 1, 1974. Т. 2, 1974. Т. 3, 1976.
10. Электротехнический справочник/Под ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. — 6-е изд. Т. 1. М.: Энергия, 1980.
11. Электротехнические материалы: Справочник/В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. — 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1983.

12. Справочник по пластическим массам/Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. — 2-е изд. М.: Химия, 1975. Т. 1, Т. 2.
13. Буц В. П., Железнов М. Т., Юринов М. М. Вакуумные конденсаторы. Л.: Энергия, 1971.
14. Сливков И. Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972.
15. Бабилов М. А., Комаров Н. С., Сергеев А. С. Техника высоких напряжений. М.: Госэнергоиздат, 1955.
16. Долгинов А. И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968.
17. Техника высоких напряжений/П. В. Борисоглебский, Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов и др./Под ред. Д. В. Разевига. М.: Госэнергоиздат, 1963.
18. Техника высоких напряжений/Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь и др./Под ред. Д. В. Разевига. — 2-е изд. М.: Энергия, 1976.
19. Казариовский Д. М., Яманов С. А. Радиотехнические материалы. М.: Высшая школа, 1972.
20. Электрорадиоматериалы/Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М. Петров, А. А. Преображенский/Под ред. Б. М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978.
21. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков: Пер. с польск./Под ред. Г. С. Кучинского. Л.: Энергия, 1972.
22. Балыгин И. Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.: Энергия, 1964.
23. Шахнович М. И. Синтетические жидкости для электрических аппаратов. М.: Энергия, 1972.
24. Крейн И. Р., Кулакова Р. В. Нефтяные изоляционные масла. М.: Госэнергоиздат, 1959.
25. Липштейн Р. А., Шахнович М. И. Трансформаторное масло. — 2-е изд. М.: Энергия, 1968.
26. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. — 3-е изд. Л.: Энергия, 1969.
27. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия, 1972. Т. 1 (А—К); 1974. Т. 2. (Л — Полинозные волокна); 1977. Т. 3 (Полиоксиды — Я).
28. Поливинилхлоридные пластики и их применение в кабельной технике/Ю. Н. Ван-Гаут, Ю. М. Котт, Ю. В. Ляхов, И. Д. Троицкий/Под ред. И. Д. Троицкого. М.: Энергия, 1978.
29. Барановский В. В., Дулицкая Г. М. Слоистые пластики электротехнического назначения. М.: Энергия, 1976.
30. Гладков А. З. Электроизоляционные лаки и компаунды. М.: Энергия, 1973.
31. Вариконды в электронных импульсных схемах/В. Ю. Булыбенко, Т. Н. Вербицкая, В. Ф. Анципарович и др./Под ред. В. Ю. Булыбенко. М.: Советское радио, 1971.
32. Пасынков В. В. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1980.
33. Смажеская Е. Г., Фельдман Н. Б. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Советское радио, 1971.
34. Глозман И. А. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972.

## Глава 24

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Н. А. Бабушкина

Термоэлектрические явления — группа физических явлений (Зеебека, Пельтье и Томсона), обусловленных существованием взаимосвязи между тепловыми и электрическими процессами в проводниках.

Эффект Зеебека состоит в том, что в электрической цепи из разнородных металлов возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС)  $E_{12}$ , если места контактов поддерживаются при разных температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

**Термо-ЭДС**  $E_{12}$  зависит только от температур  $T_1$  и  $T_2$  соединенных проводников и от природы материалов, составляющих термоэлемент. По значению  $E_{12}$  оценивают температуру в месте спая. В небольшом интервале температур имеет место зависимость  $E_{12} = S_{12}(T_1 - T_2)$ , где  $S_{12}$  — коэффициент термо-ЭДС, определяемый природой материалов термоэлемента и интервалом температур, в котором он применяется. Коэффициент  $S_{12}$  может резко меняться с температурой (и даже менять знак).

Измеряемые термо-ЭДС относятся всегда к паре металлов и поэтому не являются характеристиками отдельных металлов. В таблицах обычно приводят термо-ЭДС материалов по отношению к свинцу, платине или меди.

**Эффект Пельтье** состоит в том, что при прохождении тока через спай различных проводников кроме джоулева тепла выделяется или поглощается в зависимости от направления тока некоторое количество тепла  $Q_{\Pi}$ , пропорциональное протекающему через контакт заряду (т. е. силе тока  $I$  и времени  $t$ ),

$$Q_{\Pi} = \Pi I t,$$

где  $\Pi$  — коэффициент Пельтье, который зависит от природы находящихся в контакте материалов (см. табл. 24.6).

Эффект Пельтье так же, как эффект Зеебека, можно наблюдать лишь при наличии двух разнородных проводников.

**Эффект Томсона** заключается в обратимом выделении (или поглощении) теплоты в однородном проводнике, по которому протекает электрический ток, при одновременном наличии параллельного току градиента температуры:

$$Q_{\mu} = \mu (T_2 - T_1) I t,$$

где  $\mu$  — коэффициент Томсона, зависящий от природы материала (см. табл. 24.7);  $I$  — ток;  $t$  — время.

В противоположность явлениям Зеебека и Пельтье эффект Томсона относится к одному однородному проводнику, поэтому коэффициент  $\mu$  для любого проводника может быть определен независимо.

Согласно термодинамической теории коэффициенты Томсона  $\mu$ , Зеебека  $S$  и Пельтье  $\Pi$  связаны соотношениями Кельвина:

$$\mu = T \frac{dS}{dT}; \quad \Pi = ST.$$

По известной зависимости коэффициента Томсона от температуры можно рассчитать коэффициенты термо-ЭДС и Пельтье отдельных металлов — так называемые абсолютные коэффициенты термо-ЭДС и Пельтье металлов:

$$S = \int_0^T \frac{\mu}{T} dT.$$

Дифференциальная термо-ЭДС пары металлов представляется в виде разности абсолютных значений термо-ЭДС отдельных металлов:

$$S_{12} = S_1 - S_2.$$

Абсолютная термо-ЭДС металла при низкой температуре может быть измерена, если составить термпару из металла и сверхпроводника, так как дифференциальная термо-ЭДС в этом случае создается только ее нормальной ветвью.

Абсолютная термо-ЭДС свинца (табл. 24.1), полученная таким образом Кристиан [1], является общепризнанным стандартом, используемым для всех термоэлектрических измерений. Значения абсолютной термо-ЭДС свинца, приведенные в более поздней работе Робертса [2], отличаются от данных Кристиан при температуре выше 20 К (табл. 24.1).

При высоких температурах «стандартами» могут также служить благородные металлы: медь, серебро, зо-

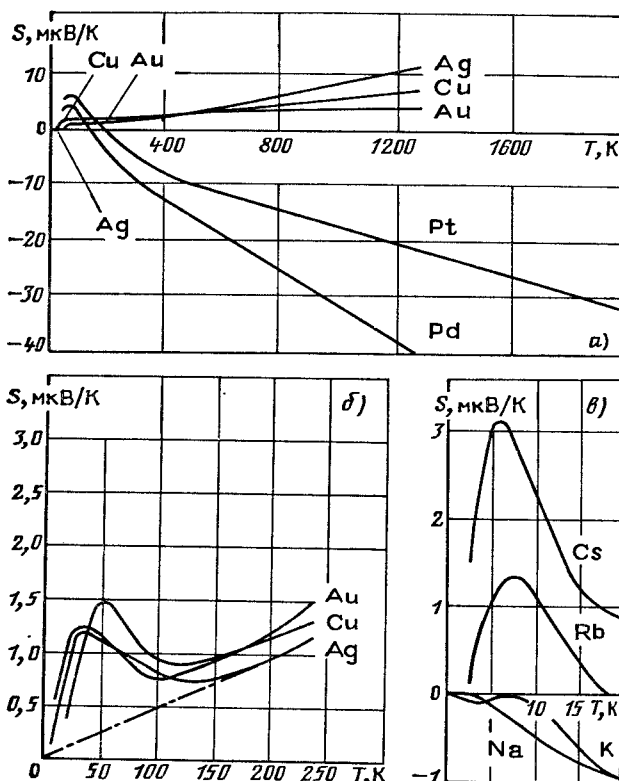


Рис. 24.1. Абсолютная термо-ЭДС металлов:

а — тугоплавких и благородных в области температур выше 300 К [5]; б — меди, серебра и золота при температурах от 0 до 250 К [7]; в — щелочных металлов при низких температурах [7]

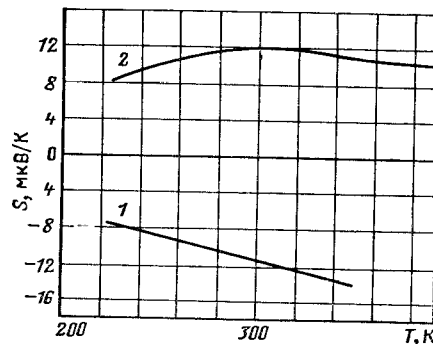


Рис. 24.2. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС щелочных металлов:

1 — обобщенная кривая для натрия, калия и рубидия; 2 — для лития [8]

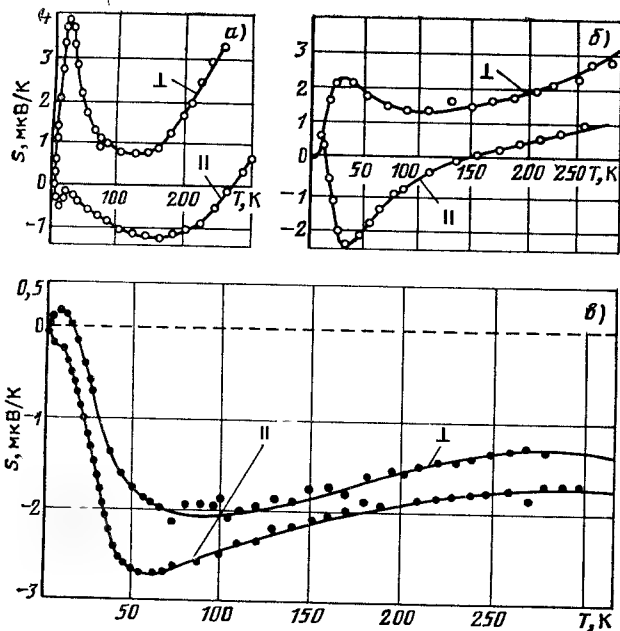


Рис. 24.3. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС кадмия (а), цинка (б) и магния (в) в параллельном (||) и перпендикулярном (⊥) гексагональным осям направлениях [9]

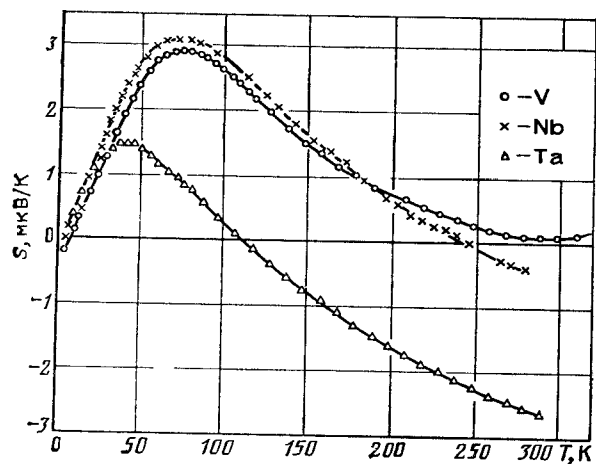


Рис. 24.4. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС ванадия, ниобия и тантала [10]

лота (табл. 24.2). Их следует предпочесть переходным металлам — платине или вольфраму, значения абсолютных термо-ЭДС которых значительно больше.

В табл. 24.3 и 24.4 представлены значения термо-ЭДС переходных металлов. В табл. 24.5 приведены дифференциальные термо-ЭДС металлов относительно платины. На рис. 24.1—24.12 приведены температурные зависимости абсолютных термо-ЭДС для ряда металлов.

Цифры, приводимые в таблицах, следует считать не абсолютно точными, а лишь наиболее заслуживающими доверия, так как термо-ЭДС материала чувствительна к ничтожному количеству примесей, к ориентации кри-

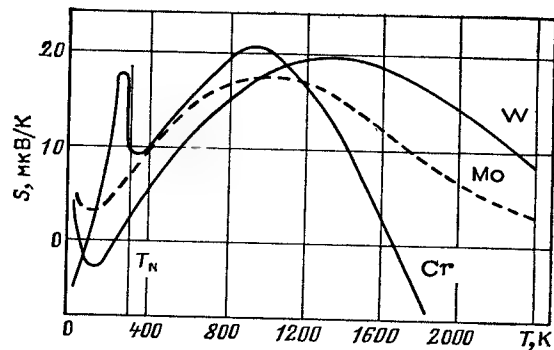


Рис. 24.5. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС вольфрама, молибдена и хрома [8];  $T_N$  — точка Нееля для хрома

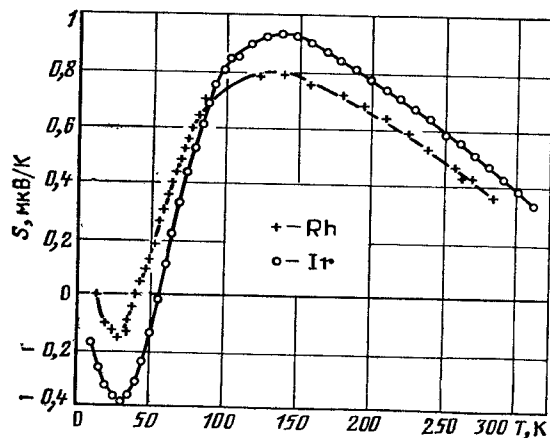


Рис. 24.6. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС родия и иридия [10]

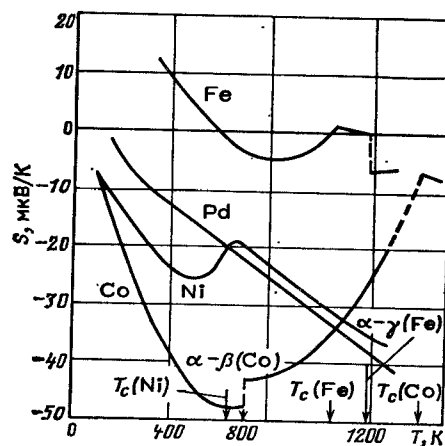


Рис. 24.7. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС никеля, железа, палладия и кобальта [11];  $T_C$  — точка Кюри;  $\alpha-\beta$ ,  $\alpha-\gamma$  — точки структурных переходов кобальта и железа



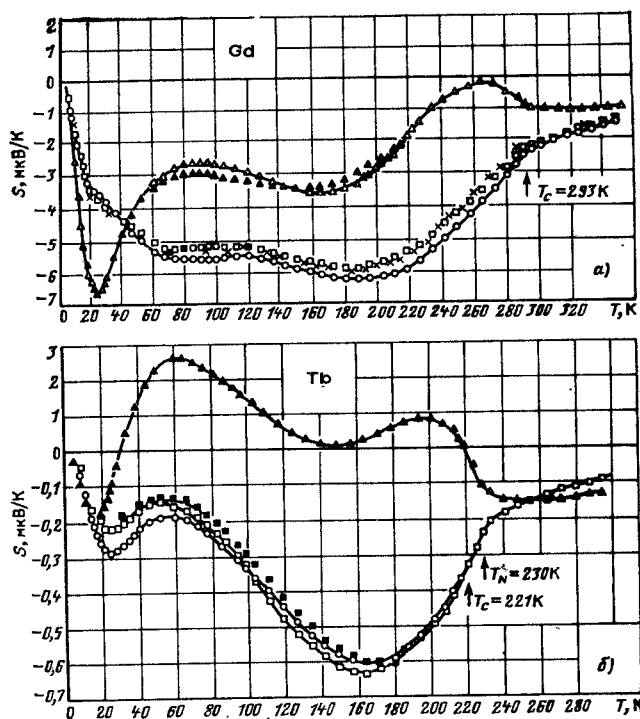


Рис. 24.8. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов:

а — гадолиния [12] (○ — в базисной плоскости, △ — по оси  $c$ , ▲ — по оси  $c$  при  $B=0,1$  Тл, □ — в плоскости  $a-c$ ,  $17^\circ$  от оси  $a$ ); б — тербия [12] (○ — по оси  $a$ , □ — по оси  $b$ , ▲ — по оси  $c$ , ■ — по оси  $b$  при  $B=0,13$  Тл)

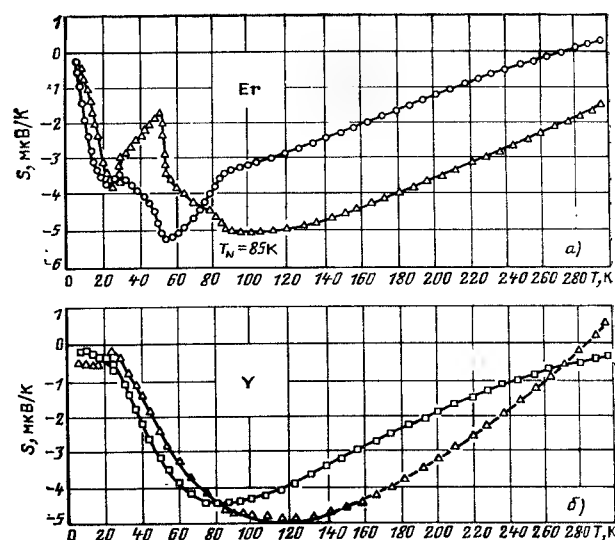


Рис. 24.10. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов эрбия (а) и иттрия (б) [12]:

○ — в базисной плоскости; △ — по оси  $c$

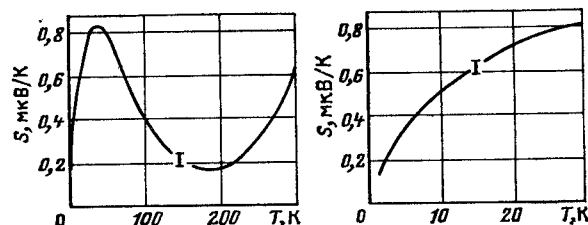


Рис. 24.11. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС марганца [13] (Cu — 82,2%, Mn — 13,3%, Ni — 4,5%)

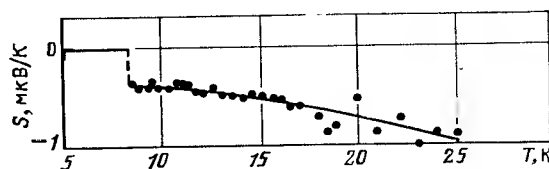


Рис. 24.12. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС сверхпроводящего сплава Nb — 48%, Ti — 52% ( $T_{кр}=9\text{ K}$ ) [14]

сталлических зерен, термической или даже холодной обработке материала. По этой причине термо-ЭДС может возникнуть (при наличии температурных перепадов) в цепи, состоящей из одного и того же материала, если различные участки цепи подвергались различной технологической обработке. При сравнении значений  $S$  материалов, измеренных разными исследователями, могут выявляться расхождения порядка 10%.

Градуировочные таблицы термопар см. в гл. 8.

Наиболее полные теоретические и экспериментальные данные по термоэлектрическим явлениям представлены в [3].

Обобщенные данные о составе, физико-химических и метрологических свойствах применяемых в настоящее время сплавов для термопар см. в [4].

Рис. 24.9. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов диспрозия (а) и гольмия (б) [12]:

○ — по оси  $a$ ; □ — по оси  $b$ ; △ — по оси  $c$

Таблица 24.1. Абсолютная термо-ЭДС чистого свинца по данным Кристиан [1] и Роберта [2]

| T, K | $S_{Kp},$<br>мкВ/К | $S_{Pob},$<br>мкВ/К | T, K  | $S_{Kp},$<br>мкВ/К | $S_{Pob},$<br>мкВ/К |
|------|--------------------|---------------------|-------|--------------------|---------------------|
| 7,25 | -0,204             | -0,204              | 40,0  | -0,764             | -0,575              |
| 7,5  | -0,221             | -0,220              | 42,0  | -0,766             | -0,564              |
| 8,0  | -0,257             | -0,226              | 44,0  | -0,768             | -0,555              |
| 8,5  | -0,297             | -0,298              | 46,0  | -0,770             | -0,548              |
| 9,0  | -0,343             | -0,343              | 48,0  | -0,772             | -0,542              |
| 9,5  | -0,390             | -0,388              | 50,0  | -0,774             | -0,537              |
| 10,0 | -0,434             | -0,433              | 55,0  | -0,777             | -0,530              |
| 10,5 | -0,475             | -0,476              | 60,0  | -0,779             | -0,527              |
| 11,0 | -0,516             | -0,517              | 65,0  | -0,782             | -0,528              |
| 11,5 | -0,556             | -0,556              | 70,0  | -0,784             | -0,531              |
| 12,0 | -0,593             | -0,593              | 80,0  | -0,794             | -0,544              |
| 12,5 | -0,628             | -0,627              | 90,0  | -0,824             | -0,562              |
| 13,0 | -0,658             | -0,657              | 100,0 | -0,865             | -0,583              |
| 13,5 | -0,683             | -0,684              | 110,0 | -0,899             | -0,606              |
| 14,0 | -0,706             | -0,707              | 120,0 | -0,927             | -0,631              |
| 14,5 | -0,728             | -0,728              | 130,0 | -0,952             | -0,656              |
| 15,0 | -0,746             | -0,745              | 140,0 | -0,980             | -0,682              |
| 15,5 | -0,760             | -0,759              | 150,0 | -1,010             | -0,708              |
| 16,0 | -0,771             | -0,770              | 160,0 | -1,034             | -0,734              |
| 16,5 | -0,777             | -0,777              | 170,0 | -1,054             | -0,760              |
| 17,0 | -0,781             | -0,782              | 180,0 | -1,075             | -0,785              |
| 18,0 | -0,785             | -0,786              | 190,0 | -1,098             | -0,810              |
| 19,0 | -0,785             | -0,784              | 200,0 | -1,120             | -0,834              |
| 20,0 | -0,784             | -0,779              | 210,0 | -1,143             | -0,858              |
| 21,0 | -0,783             | -0,771              | 220,0 | -1,161             | -0,882              |
| 22,0 | -0,782             | -0,760              | 230,0 | -1,175             | -0,904              |
| 23,0 | -0,781             | -0,748              | 240,0 | -1,191             | -0,927              |
| 24,0 | -0,780             | -0,735              | 250,0 | -1,205             | -0,948              |
| 25,0 | -0,779             | -0,721              | 260,0 | -1,224             | -0,969              |
| 26,0 | -0,778             | -0,707              | 270,0 | -1,243             | -0,989              |
| 27,0 | -0,777             | -0,694              | 280,0 | -1,259             | -1,009              |
| 28,0 | -0,776             | -0,681              | 290,0 | -1,271             | -1,028              |
| 29,0 | -0,775             | -0,669              | 300,0 | —                  | -1,047              |
| 30,0 | -0,774             | -0,657              | 310,0 | —                  | -1,065              |
| 32,0 | -0,772             | -0,636              | 320,0 | —                  | -1,084              |
| 34,0 | -0,770             | -0,617              | 330,0 | —                  | -1,101              |
| 36,0 | -0,768             | -0,601              | 340,0 | —                  | -1,119              |
| 38,0 | -0,766             | -0,587              | 350,0 | —                  | -1,136              |

Таблица 24.2. Абсолютная термо-ЭДС для некоторых металлов [5] в интервале температур от 100 до 2400 К. значения основаны на данных Pb [1]

| T, K | S, мкВ/К |       |      |        |        |       |       |
|------|----------|-------|------|--------|--------|-------|-------|
|      | Cu       | Ag    | Au   | Pt     | Pd     | W     | Mo    |
| 100  | 1,19     | 0,73  | 0,82 | 4,29   | 2,00   | —     | —     |
| 150  | 1,12     | 0,85  | 1,02 | 1,32   | -1,63  | —     | —     |
| 200  | 1,29     | 1,05  | 1,34 | -1,27  | -4,85  | —     | —     |
| 273  | 1,70     | 1,33  | 1,79 | -4,45  | -9,00  | —     | —     |
| 300  | 1,83     | 1,51  | 1,94 | -5,28  | -9,99  | 1,07  | 5,57  |
| 400  | 2,34     | 2,08  | 2,46 | -7,83  | -13,00 | 4,44  | 8,52  |
| 500  | 2,83     | 2,82  | 2,86 | -9,89  | -16,03 | 7,53  | 11,12 |
| 600  | 3,33     | 3,72  | 3,18 | -11,66 | -19,06 | 10,29 | 13,27 |
| 700  | 3,83     | 4,72  | 3,43 | -13,31 | -22,09 | 12,66 | 14,94 |
| 800  | 4,34     | 5,77  | 3,63 | -14,88 | -25,12 | 14,65 | 16,13 |
| 900  | 4,85     | 6,85  | 3,77 | -16,39 | -28,15 | 16,28 | 16,86 |
| 1000 | 5,36     | 7,95  | 3,85 | -17,86 | -31,18 | 17,57 | 17,16 |
| 1100 | 5,88     | 9,06  | 3,88 | -19,29 | -34,21 | 18,53 | 17,08 |
| 1200 | 6,40     | 10,15 | 3,86 | -20,69 | -37,24 | 19,18 | 16,65 |
| 1300 | 6,91     | —     | 3,78 | -22,06 | -40,27 | 19,53 | 15,92 |
| 1400 | —        | —     | —    | -23,41 | -43,30 | 19,60 | 14,94 |
| 1600 | —        | —     | —    | -26,06 | -49,36 | 18,97 | 12,42 |
| 1800 | —        | —     | —    | -28,66 | -55,42 | 17,41 | 9,52  |
| 2000 | —        | —     | —    | -31,23 | -61,48 | 15,05 | 6,67  |
| 2200 | —        | —     | —    | —      | —      | 12,01 | 4,30  |
| 2400 | —        | —     | —    | —      | —      | 8,39  | 2,87  |

Таблица 24.3. Значения S для чистых переходных металлов при температуре ниже комнатной, мкВ/К [3] (основаны на данных для Pb [1])

| Элемент     | Термо-ЭДС при температуре, К |      |      |       |       |       |       |       |       |
|-------------|------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 10                           | 20   | 50   | 80    | 100   | 150   | 200   | 250   | 273   |
| Группа IIIB |                              |      |      |       |       |       |       |       |       |
| Sc          | -1,6                         | -3,0 | -8,0 | -12,7 | -14,0 | -15,6 | -16,3 | -16,5 | -16,2 |
| Y*1         | -0,3                         | -0,4 | -3,3 | -4,5  | -4,4  | -3,1  | -1,9  | -0,9  | -0,7  |
|             | -0,5                         | -0,4 | -2,8 | -4,5  | -4,9  | -4,5  | -3,2  | -1,4  | -0,5  |
| La          | —                            | —    | —    | —     | +0,3  | +0,4  | +0,7  | +1,0  | +1,3  |
| Группа IVB  |                              |      |      |       |       |       |       |       |       |
| Ti          | —                            | —    | -3,0 | -3,0  | -2,6  | 0     | +2,0  | +4,0  | +4,5  |
| Zr          | —                            | —    | 0    | +3,0  | +4,5  | +7,5  | +8,5  | +9,5  | +9,5  |
| Hf          | —                            | —    | —    | 0     | 0     | +2,5  | +3,7  | +4,7  | +5,3  |

| Элемент            | Термо-ЭДС при температуре, К |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 10                           | 20    | 50    | 80    | 100   | 150   | 200   | 250   | 273   |
| <i>Группа VB</i>   |                              |       |       |       |       |       |       |       |       |
| V*2                | +0,19                        | +0,76 | +2,45 | +2,91 | +2,65 | +1,52 | +0,72 | +0,26 | +0,13 |
| Nb*2               | +0,31                        | +0,98 | +2,73 | +3,09 | +3,13 | +1,42 | +0,65 | -0,04 | -0,20 |
| Ta*2               | +0,36                        | +1,03 | +1,41 | +0,78 | 0     | -0,8  | -1,5  | -2,0  | -2,2  |
| <i>Группа VIB</i>  |                              |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Cr*3               | +3,1                         | +6,7  | +8,2  | +5,0  | +5,0  | +7,0  | +11,8 | +17,5 | +18,8 |
| Mo*3               | -0,02                        | -0,11 | -0,48 | -0,2  | +0,1  | +0,94 | +2,50 | +4,08 | +4,57 |
| W*3                | +0,05                        | -0,28 | -2,78 | -3,70 | -4,04 | -2,45 | -1,41 | -0,10 | +0,56 |
| <i>Группа VIIB</i> |                              |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Mn                 | —                            | +12,5 | +15,5 | +6    | -2,5  | -7,0  | -8,5  | -9,7  | -10,0 |
| Tc                 | —                            | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     |
| Re                 | +0,61                        | +1,32 | +1,18 | +0,08 | -0,66 | -2,21 | -3,51 | 4,63  | -5,03 |
| <i>Группа VIII</i> |                              |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Fe*4               | +1,0                         | +2,5  | +8,0  | +12,0 | +13,0 | +16,0 | +17,0 | +15,5 | +15,0 |
| Ru                 | —                            | —     | —     | +0,2  | 0     | -1,1  | -1,5  | -1,5  | -1,5  |
| Os                 | —                            | —     | —     | -2,2  | -3,2  | -3,8  | -4,0  | -4,0  | -4,0  |
| Co*4               | —                            | -0,5  | -1,0  | -3,0  | -4,0  | -9,0  | -12,0 | -18,0 | -19,0 |
| Rh*5               | -0,19                        | -0,33 | -0,11 | +0,54 | +0,78 | +0,92 | +0,75 | +0,58 | +0,48 |
| Ir*5               | —                            | -0,11 | +0,13 | +0,57 | +0,73 | +0,77 | +0,64 | +0,46 | +0,35 |
| Ni*4               | -2,0                         | -4,7  | -7,2  | -8,1  | -11,0 | -11,0 | -13,5 | -17,0 | -18,0 |
| Pd*4               | +0,4                         | +1,6  | +4,3  | +3,7  | +2,00 | -1,63 | -4,85 | -7,42 | -9,00 |
| Pt                 | +0,6                         | +2,3  | +5,8  | +5,5  | +4,29 | +1,82 | -1,27 | -3,28 | -4,45 |

\*1 В числителе данные для баансной плоскости, в знаменателе — вдоль оси с.

\*2 См. также рис. 24.4 [9].

\*3 См. также рис. 24.5 [7].

\*4 См. также рис. 24.7 [10].

\*5 См. также рис. 24.6 [9].

Таблица 24.4. Области линейной зависимости термо-ЭДС переходных металлов [3, 8]

| Элемент     | Температурный интервал<br>линейности, К | Диапазон изменения<br>термо-ЭДС, мВ | Элемент      | Температурный интервал<br>линейности, К | Диапазон изменения<br>термо-ЭДС, мВ |          |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| Группа IIIB |                                         |                                     | Группа VIIB  |                                         |                                     |          |
| Sc          | 150—500                                 | -7,2÷-5                             | Mn           | 300—1000                                | -10÷-4                              |          |
| La          | 750—1400                                | -5÷9                                | Re           | 450—1500                                | -7÷-1                               |          |
|             | 300—583                                 | -2÷2,3                              |              |                                         |                                     |          |
| Группа IVB  |                                         |                                     | Группа VIIIB |                                         |                                     |          |
| Ti          | 400—800                                 | 3÷-5                                | Fe           | 300—700                                 | 12÷-5                               |          |
| Zr          | 400—800                                 | 7,5÷-5                              |              | 500—1800                                | -2÷-9,5                             |          |
| Hf          | 900—1400                                | -6÷2                                |              | Os                                      | 600—1800                            | -3,8÷-10 |
|             | 500—1000                                | 8—0                                 |              | Co                                      | 100—500                             | -5÷-46   |
| Группа VB   |                                         |                                     |              |                                         | 1400—1600                           | -8÷-8,5  |
| V           | 500—1100                                | 1—6                                 | Rh           | 600—1700                                | 0,5÷-0,8                            |          |
| Nb          | 600—1400                                | -1,5÷6                              | Ir           | 300—1300                                | 1÷-0,4                              |          |
| Ta          | 1100—1800                               | -2÷9                                |              | 1400—1800                               | -4,5÷-9                             |          |
|             |                                         |                                     | Ni           | 200—500                                 | -15÷-2,5                            |          |
| Группа VIB  |                                         |                                     |              | 600—1500                                | -20÷40                              |          |
| Cr          | 500—800                                 | 10—12                               | Pd           | 300—1800                                | -10÷-30                             |          |
| Mo          | 300—600                                 | 6—13                                | Pt           | 400—2000                                | -8÷55                               |          |
|             | 1200—2100                               | 1,6—7                               |              |                                         |                                     |          |
| W           | 200—300                                 | -2÷2,5                              |              |                                         |                                     |          |
|             | 1800—2400                               | 17—8                                |              |                                         |                                     |          |

Таблица 24.5. Значения термо-ЭДС материалов (мВ) относительно платины для различных температур в градусах шкалы МПТШ-68 [6]

Температура свободных концов термопары 273 К. Положительный знак термо-ЭДС металла соответствует току через спай термопары, идущему от платины к этому металлу.

| Материал                                                      | Температура, К |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                               | 73             | 173    | 373    | 473    | 673    | 873    | 1073   | 1273   | 1473   | 1673   |
| <b>Элементы</b>                                               |                |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Алюминий                                                      | 0,45           | 0,06   | 0,42   | 1,06   | 2,84   | 5,15   | —      | —      | —      | —      |
| Висмут                                                        | -0,04          | -0,31  | 0,90   | 2,35   | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Вольфрам                                                      | 0,43           | -0,15  | 1,12   | 2,62   | 6,70   | 12,26  | 19,25  | 27,73  | 37,72  | —      |
| Германий                                                      | -44,00         | -26,62 | 33,9   | 72,4   | 82,3   | 43,9   | —      | —      | —      | —      |
| Золото                                                        | -0,21          | -0,39  | 0,78   | 1,84   | 4,63   | 8,12   | 12,26  | 17,05  | —      | —      |
| Индий                                                         | —              | —      | 0,69   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Иридий                                                        | -0,25          | -0,35  | 0,65   | 1,49   | 3,55   | 6,10   | 9,10   | 12,57  | 16,45  | 20,47  |
| Кадмий                                                        | -0,04          | -0,31  | 0,90   | 2,35   | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Калий                                                         | 1,61           | 0,78   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Кальций                                                       | —              | —      | -0,51  | -1,13  | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Кобальт                                                       | —              | —      | -1,33  | -3,08  | -7,24  | -11,28 | -13,99 | -14,21 | —      | —      |
| Кремний                                                       | 63,13          | 37,17  | -41,56 | -80,57 | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Литий                                                         | -1,12          | -1,00  | 1,82   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Магний                                                        | 0,37           | -0,09  | 0,44   | 1,10   | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Медь                                                          | -0,19          | -0,37  | 0,76   | 1,83   | 4,68   | 8,34   | 12,81  | 18,16  | —      | —      |
| Молибден                                                      | —              | —      | 1,45   | 3,19   | 7,57   | 13,13  | 19,83  | 27,74  | 36,96  | —      |
| Натрий                                                        | 1,00           | -0,29  | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Никель                                                        | 2,28           | 1,12   | -1,48  | -3,10  | -5,45  | -7,04  | -9,83  | -12,11 | —      | —      |
| Олово                                                         | 0,26           | -0,12  | 0,42   | 1,07   | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Палладий                                                      | 0,81           | 0,48   | -0,57  | -1,23  | -2,82  | -5,03  | -7,96  | -11,61 | -15,86 | -20,40 |
| Родий                                                         | -0,20          | -0,34  | 0,70   | 1,61   | 3,91   | 6,77   | 10,14  | 14,02  | 18,39  | 22,99  |
| Рубидий                                                       | 1,09           | 0,46   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Ртуть                                                         | —              | —      | -0,60  | -1,33  | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Свинец                                                        | 0,24           | -0,13  | 0,44   | 1,09   | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Серебро                                                       | -0,21          | -0,39  | 0,74   | 1,77   | 4,57   | 8,41   | 13,33  | —      | —      | —      |
| Сурьма                                                        | —              | —      | 4,89   | 10,14  | 20,53  | 28,87  | —      | —      | —      | —      |
| Таллий                                                        | —              | —      | 0,58   | 1,30   | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Тантал                                                        | 0,21           | -0,10  | 0,33   | 0,93   | 2,91   | 5,95   | 10,02  | 15,15  | 21,37  | —      |
| Торий                                                         | —              | —      | -0,13  | -0,26  | -0,50  | -0,45  | 0,22   | 1,72   | 4,03   | —      |
| Углерод                                                       | —              | —      | 0,70   | 1,54   | 3,72   | 6,79   | 10,98  | 16,46  | —      | —      |
| Церий                                                         | 0,22           | -0,13  | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      |
| Цинк                                                          | -0,07          | -0,33  | 0,76   | 1,89   | 5,29   | —      | —      | —      | —      | —      |
| <b>Материалы для термопар</b>                                 |                |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Алюмель (94% Ni+2% Al+2% Si+2% Mn)                            | -2,39          | 1,29   | -1,29  | -2,17  | -3,64  | -5,28  | -7,07  | -8,78  | -10,33 | -11,72 |
| Хромель (90% Ni+10% Cr)                                       | -3,36          | -2,20  | 2,81   | 5,96   | 12,75  | 19,61  | 26,20  | 32,47  | 38,48  | 44,04  |
| Константан (60% Cu+40% Ni)                                    | 5,35           | 2,98   | -3,51  | -7,45  | -16,19 | -25,46 | -34,81 | -43,85 | —      | —      |
| <b>Сплавы</b>                                                 |                |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Манганин (84% Cu+4% Ni+12% Mn)                                | —              | —      | 0,61   | 1,55   | 4,25   | 7,84   | —      | —      | —      | —      |
| Нихром (80% Ni+20% Cr)                                        | —              | —      | 1,14   | 2,62   | 6,25   | 10,53  | 15,41  | 20,87  | —      | —      |
| Ферронихром (60% Ni+24% Fe+16% Cr)                            | —              | —      | 0,85   | 2,01   | 5,00   | 8,68   | 13,03  | 18,06  | —      | —      |
| Бронза бериллиевая (98% Cu+2% Be)                             | —              | —      | 0,67   | 1,26   | 4,19   | —      | —      | —      | —      | —      |
| Бронза фосфористая (85% Cu+13% Sn+1,86% Zn+0,16% Pb+0,013% P) | —              | —      | 0,55   | 1,34   | 3,50   | 6,30   | —      | —      | —      | —      |

Таблица 24.6. Значения коэффициента Пельтье для различных пар металлов [15]

| Железо — кон-<br>стантан |       | Медь — никель |       | Свинец — константан |       |
|--------------------------|-------|---------------|-------|---------------------|-------|
| T, К                     | P, мВ | T, К          | P, мВ | T, К                | P, мВ |
| 273                      | 13    | 292           | 8,0   | 293                 | 8,7   |
| 293                      | 15    | 328           | 9,0   | 383                 | 11,8  |
| 403                      | 19    | 478           | 10,3  | 508                 | 16,0  |
| 513                      | 26    | 563           | 8,6   | 578                 | 18,7  |
| 593                      | 34    | 613           | 8,0   | 633                 | 20,6  |
| 833                      | 52    | 718           | 10,0  | 713                 | 23,4  |

Примечание. Медь — константан:  $P = 11,0$  мВ при  $T = 293$  К.

Таблица 24.7. Значения коэффициента Томсона для различных металлов [15]

| Металл               |      | T, К | $\rho$ , мкВ/К |
|----------------------|------|------|----------------|
| Ag                   |      | 105  | -0,10          |
|                      |      | 150  | +0,55          |
|                      |      | 300  | +1,31          |
| Al (99 %)            |      | 260  | +0,11          |
|                      |      | 300  | -0,08          |
|                      |      | 400  | -0,56          |
| Au                   |      | 105  | +0,29          |
|                      |      | 150  | +0,96          |
|                      |      | 300  | +1,61          |
| Cd<br>(монокристалл) | *    | 373  | +6,9           |
|                      |      | 473  | +7,3           |
|                      | ⊥ 2* | 373  | +8,2           |
|                      |      | 473  | +8,7           |
| Co                   |      | 100  | -8,4           |
|                      |      | 200  | -19,6          |
|                      |      | 300  | -25,4          |
| Cu                   |      | 70   | -0,26          |
|                      |      | 170  | +0,47          |
|                      |      | 300  | +1,52          |
| Cu + 0,37% Au        |      | 20   | +0,44          |
|                      |      | 40   | +2,17          |
|                      |      | 60   | +2,96          |
|                      |      | 90   | +2,20          |
|                      |      | 130  | +1,71          |
|                      |      | 300  | +2,33          |
| Fe (армко)           |      | 323  | -15,3          |
|                      |      | 423  | -22,8          |
|                      |      | 523  | -26,3          |

Продолжение табл. 24.7

| Металл               | T, К | $\mu$ , мкВ/К |      |
|----------------------|------|---------------|------|
| Ni                   | 100  | -4,5          |      |
|                      | 200  | -12,1         |      |
|                      | 260  | -15,7         |      |
| Pb (99,99%)          | 120  | -0,19         |      |
|                      | 200  | -0,45         |      |
|                      | 400  | -0,85         |      |
| Pd                   | 20   | +1,9          |      |
|                      | 100  | -7,8          |      |
|                      | 200  | -12,1         |      |
|                      | 300  | -18,2         |      |
| Pt                   | 203  | -9,6          |      |
|                      | 273  | -9,1          |      |
|                      | 393  | -9,2          |      |
| Sn (99,99%)          | 100  | +0,86         |      |
|                      | 200  | +0,42         |      |
|                      | 300  | -0,07         |      |
|                      | 400  | -0,45         |      |
| Zn<br>(монокристалл) | *    | 322,5         | +1,6 |
|                      |      | 398           | +4,6 |
|                      | ⊥ 2* | 322,5         | +4,1 |
|                      |      | 398           | +8,8 |
| W                    | 328  | +8,5          |      |
| Константан           | 323  | -24,6         |      |
|                      | 384  | -25,5         |      |
|                      | 446  | -26,0         |      |
| Нейзильбер           | 328  | -12,0         |      |

\*1 || — образец вырезан вдоль гексагональной оси кристалла (томсон-эффект измеряется вдоль образца).

\*2 ⊥ — образец вырезан под углом 90° к гексагональной оси кристалла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chistian J. W., Jan J.-P., Preason W. B., Templeton I. M. // Proc. Roy. Soc. Lond. 1958. Vol. A245. P. 213—221.
2. Roberts R. B. // Phil. Mag. 1977. Vol. 36, № 1. P. 91—107.
3. Блатт Ф. Д. Термоэлектродвижущая сила металлов: Пер. с англ./Под ред. Д. К. Белащенко. М.: Металлургия, 1980.
4. Рогельберг И. Л., Бейлин В. М. Сплавы для термомпар: Справочник. М.: Металлургия, 1983.
5. Cusack N., Kendall P. // Proc. Phys. Soc. 1958. Vol. 72. P. 898—893.

6. Physics Vade Mecum AIP 50th Anniversary/Ed. Herbert L. Anderson N. Y., AIP, 1981.

7. Mac Donald D. K. C. Thermoelectricity: An Introduction to the Principles. N. Y.: John Wiley and Sons, 1962.

8. Vedernikov M. N., Burkov A. T. Present state of experimental knowledge on thermopower of metals at high temperatures above 77 K.: Thermoelectricity in Metallic Conductors/Ed. F. J. Blatt. N. Y. Lond.: Plenum Press, 1978.

9. Rowe V. A., Schroeder P. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. P. 1—8.

10. Carter R., Davidson A., Schroeder P. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31, № 10. P. 2374—2376.

11. Greig D. Thermoelectricity in transition metals.— Thermoelectricity in Metallic Conductors/Ed. F. J. Blatt. N. Y. — Lond., Plenum Press, 1978.

12. Sill L. R., Legvold S.//Phys. Rev. 1965. Vol. 137, № 4A. P. 1139—1145.

13. Rathnayaka K. D. D.//J. Phys. E. Sci. Instrum. 1985. Vol. 18, № 5. P. 380—382.

14. Harmans C.//Cryogenics. 1982. Vol. 22, N 1. P. 39—40.

15. Landolt-Börnstein. Zahlenwerde und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag, 1959.

## Глава 25

# ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ

Т. М. Лифшиц, А. Л. Мусатов

### 25.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Электронная и ионная эмиссия — испускание электронов или ионов телами под влиянием внешних воздействий: нагревания, потока фотонов, электронов, ионов или сильного электрического поля. В зависимости от характера внешнего воздействия различают соответственно термоэлектронную, термоионную, фотоэлектронную, вторичную электронную и вторичную ионную, электронно-ионную, ионно-электронную и полевою (иначе — туннельную или автоэлектронную) эмиссии. Во всех видах эмиссии, кроме полевой, роль внешних воздействий состоит в увеличении энергии части электронов или ионов тела до значения, позволяющего преодолеть действие сил, которые связывают их с телом, и выйти в вакуум или в другую среду. При ионной эмиссии эмитироваться могут как положительные, так и отрицательные ионы.

Тело, испускающее электроны или ионы, называется *эмиттером*. Для наблюдения и использования электронной или ионной эмиссии необходимо создать у поверхности эмиттера электрическое поле, отсасывающее эмитированные частицы. Обычно для достижения эмиссионным током насыщения достаточно приложить небольшое поле (десятки или сотни вольт на сантиметр). В случае полевой эмиссии внешнее электрическое поле превращает потенциальный порог, существующий на границе тела и препятствующий выходу электронов, в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту, вследствие чего становится возможным квантовомеханическое тунелирование электронов сквозь барьер. При этом энергия электрического поля затрачивается только на ускорение эмитированных электронов. Для возникновения полевой эмиссии необходимо приложить к телу сильное электрическое поле ( $\mathcal{E} \sim 10^7$  В/см), при этом плотность тока может достигнуть  $10^7$  А/см<sup>2</sup>. При еще больших импульсных полях локальные участки эмиттера (выступы, заострения) сильно разогреваются (чаще всего током полевой эмиссии) и взрываются. Часть вещества эмиттера переходит из конденсированной фазы в плотную плазму. Этот процесс сопровождается испусканием интенсивного электронного потока — возникает взрывная электронная эмиссия. Монографии и обзоры по эмиссионной электронике и различным видам эмиттеров приведены в [1—4, 7, 12, 14—17, 27—30, 34].

### 25.2. РАБОТА ВЫХОДА

Важнейшей эмиссионной характеристикой твердых тел является *работа выхода*  $e\phi$  ( $e$  — заряд электрона,  $\phi$  — потенциал), равная минимальной энергии, которая необходима для перемещения электрона с поверхности Ферми в теле в вакуум, в точку пространства, где напряженность электрического поля практически равна нулю [1]. Если отсчитывать потенциал от уровня, соответствующего покоящемуся электрону в вакууме, то  $\phi$  — потенциал внутри кристалла, отвечающий уровню Ферми. Согласно современным представлениям в поверхностный потенциальный барьер, при преодолении которого и совершается работа выхода, основной вклад вносят обменные и корреляционные эффекты, а также — в меньшей степени — электрический двойной слой у поверхности тела. Наиболее распространенные методы экспериментального определения работы выхода — эмиссионные: по температурной, спектральной или полевой зависимости соответственно термо- фото- или полевой эмиссии, а также по измерению контактной разности потенциалов между исследуемым телом и другим телом (анодом), работа выхода которого известна [1, 2]. В табл. 25.1, 25.3 и 25.4 приведены значения работы выхода простых веществ и некоторых соединений. Внешнее электрическое поле уменьшает работу выхода (эффект Шоттки). Если поверхность эмиттера однородна, то уменьшение работы выхода,  $\Delta V$ , при наложении электрического поля напряженностью  $\mathcal{E}$ , В/см, равно

$$\Delta(e\phi) = e^3 \mathcal{E}^{1/2} = 3,79 \cdot 10^{-4} \mathcal{E}^{1/2}.$$

Тонкие слои адсорбированных щелочных и щелочно-земельных металлов на поверхности тел существенно снижают работу выхода. Особенно сильно уменьшается работа выхода металлов и полупроводников при адсорбции на их предварительно очищенных поверхностях слюев цезия, бария и их оксидов. Углерод и кислород при адсорбции на поверхности тел, как правило, увеличивают их работу выхода (табл. 25.2, рис. 25.1 и 25.2).

Таблица 25.1. Работа выхода простых веществ  
(в круглых скобках приведены кристаллографические  
индексы граней) [2]

| Элемент   | е ф, эВ                                                |                                                                                                                                          |
|-----------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | Поликристалл [2]                                       | Монокристалл [3]                                                                                                                         |
| Алюминий  | 4,25                                                   | 4,41 (100)<br>4,06 (110)<br>4,24 (111)                                                                                                   |
| Барий     | 2,49                                                   | —                                                                                                                                        |
| Бериллий  | 3,92                                                   | —                                                                                                                                        |
| Бор       | 4,5                                                    | —                                                                                                                                        |
| Ванадий   | 4,12                                                   | —                                                                                                                                        |
| Висмут    | 4,4                                                    | —                                                                                                                                        |
| Вольфрам  | 4,54                                                   | 4,63 (100)<br>5,25 (110)<br>4,47 (111)<br>4,18 (113)<br>4,30 (116)                                                                       |
| Гадолиний | 3,1                                                    | —                                                                                                                                        |
| Галлий    | 3,96                                                   | —                                                                                                                                        |
| Гафний    | 3,53                                                   | —                                                                                                                                        |
| Германий  | 4,76                                                   | 4,80 (111)                                                                                                                               |
| Гольмий   | 3,22                                                   | —                                                                                                                                        |
| Диспрозий | 3,25                                                   | —                                                                                                                                        |
| Европий   | 2,5                                                    | —                                                                                                                                        |
| Железо    | 4,31<br>4,70 $\alpha$<br>4,62 $\beta$<br>4,68 $\gamma$ | 4,67 (100)<br>4,81 (111)<br>—<br>—                                                                                                       |
| Золото    | 5,1[3]                                                 | 5,47 (100)<br>5,37 (110)<br>5,31 (111)                                                                                                   |
| Индий     | 3,8                                                    | —                                                                                                                                        |
| Иридий    | 5,27[3]                                                | 5,42 (110)<br>5,76 (111)<br>5,67 (100)<br>5,00 (210)                                                                                     |
| Иттрий    | 3,3                                                    | —                                                                                                                                        |
| Кадмий    | 4,1                                                    | —                                                                                                                                        |
| Калий     | 2,22                                                   | 2,39 (110)                                                                                                                               |
| Кальций   | 2,80                                                   | —                                                                                                                                        |
| Кобальт   | 4,41                                                   | —                                                                                                                                        |
| Кремний   | 4,8                                                    | 4,85 (100)*1<br>4,91 (100)*2<br>4,60 (111)*2                                                                                             |
| Лантан    | 3,3                                                    | —                                                                                                                                        |
| Литий     | 2,38                                                   | —                                                                                                                                        |
| Лютеций   | 3,33                                                   | —                                                                                                                                        |
| Магний    | 3,64                                                   | —                                                                                                                                        |
| Марганец  | 3,83                                                   | —                                                                                                                                        |
| Медь      | 4,40                                                   | 4,59 (100)<br>4,48 (110)<br>4,98 (111)<br>4,53 (112)<br>4,53 (100)<br>4,95 (110)<br>4,55 (111)<br>4,36 (112)<br>4,50 (114)<br>4,55 (332) |
| Молибден  | 4,3                                                    | —                                                                                                                                        |
| Мышьяк    | 3,75[3]                                                | —                                                                                                                                        |
| Натрий    | 2,35                                                   | —                                                                                                                                        |
| Неодим    | 3,2                                                    | —                                                                                                                                        |
| Никель    | 4,50                                                   | 5,22 (100)<br>5,04 (110)<br>5,35 (111)                                                                                                   |

Продолжение табл. 25.1

| Элемент   | е ф, эВ          |                                                                                                |
|-----------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | Поликристалл [2] | Монокристалл [3]                                                                               |
| Нюбий     | 3,99             | 4,02 (001)<br>4,87 (110)<br>4,36 (111)<br>4,63 (112)<br>4,29 (113)<br>3,95 (116)<br>4,18 (310) |
| Олово     | 4,38             | —                                                                                              |
| Осмий     | 4,7              | —                                                                                              |
| Палладий  | 4,8              | 5,6 (111)                                                                                      |
| Платина   | 5,32             | 5,7 (111)                                                                                      |
| Празеодим | 2,7              | —                                                                                              |
| Рений     | 5,0              | 5,75 (1011)                                                                                    |
| Родий     | 4,75             | —                                                                                              |
| Ртуть     | 4,52             | —                                                                                              |
| Рубидий   | 2,16             | —                                                                                              |
| Рутений   | 4,60             | —                                                                                              |
| Самарий   | 2,7              | —                                                                                              |
| Свинец    | 4,0              | —                                                                                              |
| Селен     | 4,72             | —                                                                                              |
| Серебро   | 4,3              | 4,64 (100)<br>4,52 (110)<br>4,74 (111)                                                         |
| Скандий   | 3,3              | —                                                                                              |
| Стронций  | 2,35             | —                                                                                              |
| Сурьма    | 4,08             | 4,7 (100)                                                                                      |
| Таллий    | 3,7              | —                                                                                              |
| Тантал    | 4,12             | 4,15 (100)<br>4,80 (110)<br>4,00 (111)                                                         |
| Теллур    | 4,73             | —                                                                                              |
| Тербий    | 3,15             | —                                                                                              |
| Титан     | 3,95             | —                                                                                              |
| Торий     | 3,30             | —                                                                                              |
| Тулий     | 3,10             | —                                                                                              |
| Углерод   | 4,7              | —                                                                                              |
| Уран      | 3,3              | 3,73 (100)<br>3,90 (110)<br>3,67 (113)                                                         |
| Хром      | 4,58             | —                                                                                              |
| Цезий     | 1,81             | —                                                                                              |
| Церий     | 2,7              | —                                                                                              |
| Цинк      | 4,24             | 4,9 (0001)                                                                                     |
| Цирконий  | 3,9              | —                                                                                              |
| Эрбий     | 3,25             | —                                                                                              |

\*1 п-Тип.

\*2 р-Тип.

Таблица 25.2. Работа выхода поликристаллических  
простых веществ, покрытых оптимальным слоем адсорбата  
[2]. Вещества расположены по латинскому алфавиту

| Вещество —<br>адсорбат | еф, эВ  | Вещество —<br>адсорбат | еф, эВ |
|------------------------|---------|------------------------|--------|
| Ag—O, Cs               | 1,0—1,2 | Au—C                   | 4,05   |
| Ag—Ba                  | 1,56    | Au—O                   | 5,66   |
| Ag—Cs                  | 1,65    | Be—Cs                  | 1,94   |
| Au—Cs                  | 1,8     | C—Cs                   | 1,37   |
| Au—Ba                  | 2,3     | Ce—Ba                  | 2,2    |
|                        |         | Cr—Cs                  | 1,71   |

Продолжение табл. 25.2

| Вещество — адсорбат | $e\varphi$ , эВ | Вещество — адсорбат | $e\varphi$ , эВ |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Cu—Cs               | 1,64            | Pt—O                | 6,55            |
| Cu—Ba               | 3,35            | Re—Cs               | 1,4—1,51        |
| Fe—Cs               | 1,82            | Re—K                | 1,72*           |
| Hf—Ba               | 2,3—2,4         | Re—Y                | 2,38            |
| Ir—Cs               | 1,79            | Re—Ba               | 2,42            |
| Ir—Ba               | 2,4             | Re—Th               | 2,58—3,15       |
| Mo—Cs               | 1,54—1,66       | Rh—Ba               | 2,1—2,2         |
| Mo—K                | 1,76            | Ru—Ba               | 2,22            |
| Mo—Ba               | 2,2             | Ta—Cs               | 1,6—1,69        |
| Mo—Na               | 2,64            | Ta—Ba               | 2,2             |
| Nb—Cs               | 1,37            | Ta—Th               | 2,52            |
| Nb—Ba               | 2,2             | Ta—Y                | 3,02            |
| Ni—Cs               | 1,37            | W—Cs                | 1,62—1,78       |
| Ni—Ba               | 1,52            | W—Ba, O             | 1,96            |
| Os—Cs               | 1,44—1,5        | W—K                 | 2,0             |
| Os—Ba               | 2,22            | W—Ba                | 2,1             |
| Pd—Cs               | 1,51            | W—Y                 | 3,0             |
| Pt—Rb               | 1,57            | W—Th                | 3,0—3,3         |
| Pt—Cs               | 1,59            | W—αU                | 3,37            |
| Pt—K                | 1,69            | W—βU                | 3,31            |
| Pt—Ba               | 2,05            | W—γU                | 3,19            |
| Pt—Na               | 2,10            |                     |                 |

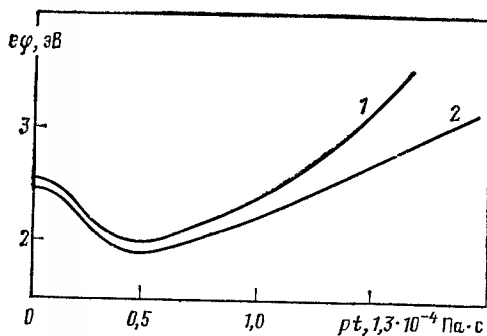


Рис. 25.1. Изменение работы выхода монослоя бария на поверхностях (100) вольфрама (1) и иридия (2) в процессе окисления. По оси абсцисс отложена экспозиция поверхности в кислороде [5]

Таблица 25.4 Работа выхода тугоплавких соединений переходных металлов с неметаллами [4]

| Металл   | $e\varphi$ , эВ | $e\varphi$ , эВ, для соединений |                             |               |                             |
|----------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
|          |                 | бориды                          | карбиды                     | нитриды       | силициды                    |
| Ванадий  | 4,12            | VB <sub>2</sub> 3,88            | VC 3,85                     | VN 3,56       | —                           |
| Вольфрам | 4,54            | WB <sub>2</sub> 2,62            | W <sub>2</sub> C 2,6—4,58   | —             | WSi <sub>2</sub> 4,04—4,62  |
| Гафний   | 3,53            | HfB <sub>2</sub> 3,85           | HfC 2,04—4,15               | HfN 3,85—3,90 | —                           |
| Железо   | 4,31            | FeB <sub>2</sub> 3,5—3,75       | —                           | —             | —                           |
| Иттрий   | 3,3             | YB <sub>6</sub> 2,22—3,58       | —                           | —             | YSi <sub>2</sub> 3,26       |
| Лантан   | 3,3             | LaB <sub>6</sub> 2,41—3,20      | —                           | —             | —                           |
| Марганец | 3,83            | MnB <sub>2</sub> 4,14           | —                           | —             | —                           |
| Молибден | 4,3             | MoB <sub>2</sub> 3,83—4,14      | Mo <sub>2</sub> C 3,80—4,74 | —             | MoSi <sub>2</sub> 4,02—4,73 |
| Ниобий   | 3,99            | NbB <sub>2</sub> 3,65           | NbC 2,24—4,1                | NbN 3,92      | NbSi <sub>2</sub> 4,34      |
| Рений    | 5,0             | —                               | —                           | —             | ReSi <sub>2</sub> 4,02      |
| Скандий  | 3,3             | ScB <sub>2</sub> 2,29—3,76      | —                           | —             | —                           |
| Тантал   | 4,2             | TaB <sub>2</sub> 2,8—4,4        | TaC 3,05—4,4                | TaN 3,8—4,42  | TaSi <sub>2</sub> 4,42—4,71 |
| Титан    | 3,95            | TiB <sub>2</sub> 3,80—3,95      | TiC 2,35—4,12               | TiN 2,92—3,75 | TiSi <sub>2</sub> 3,95      |
| Хром     | 4,58            | CrB <sub>2</sub> 3,36           | —                           | —             | CrSi <sub>2</sub> 3,78      |
| Цирконий | 3,9             | ZrB <sub>2</sub> 3,60—4,48      | ZrC 2,1—4,39                | ZrN 2,92—3,90 | ZrSi <sub>2</sub> 3,95      |

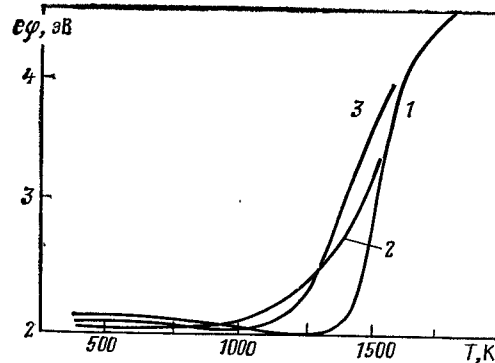


Рис. 25.2. Изменение работы выхода поверхностей (100) вольфрама (1), (100) иридия (2) и сплава осмий—иридий (3), покрытых пленкой оксида бария толщиной (0,8) монослоя, при нагревании [5]

Таблица 25.3. Работа выхода некоторых монокристаллических полупроводников [2] (в скобках для работы выхода указаны погрешности)

| Полупроводник                   | Индекс грани | $e\varphi$ , эВ | Примечания            |
|---------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------|
| AgAsS <sub>2</sub>              | (100)        | 5,7             | Сколотая грань        |
| AlSb                            | (110)        | 4,86            | p-Тип, сколотая грань |
| Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> | (0001)       | 5,40            |                       |
| GaAs                            | (100)        | 4,38 (0,05)     | p-Тип                 |
|                                 | (110)        | 4,05—4,45       | n-Тип                 |
|                                 | (110)        | 4,65—5,35       | p-Тип                 |
|                                 | (111)        | 5,13            | n-Тип                 |
| GaSb                            | (100)        | 4,0             | p-Тип                 |
|                                 | (110)        | 4,55            | p-Тип                 |
|                                 | (110)        | 4,01 (0,02)     | n-Тип                 |
| InAs                            | (110)        | 4,9 (0,05)      | Сколотая грань        |
| InSb                            | (110)        | 4,57—4,77       |                       |
|                                 | (111)        | 4,39—4,43       |                       |
| PbS                             | (100)        | 3,5 (0,2)       | Сколотая грань        |
| PbSe                            | (001)        | 4,14—4,30       | n-и p-Типы            |
| PbTe                            | (100)        | 5,14 (0,2)      | n-и p-Типы            |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | (010)        | 4,5 (0,2)       |                       |
|                                 | (010)        | 6,71 (0,08)     |                       |



### 25.3. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии (ТЭ) для эмиттера с однородной поверхностью при слабом внешнем электрическом поле, не влияющем на работу выхода, определяется уравнением Ричардсона — Дэшмана [2]:

$$j_{\text{э}} = (1 - \bar{r}) A_0 T^2 \exp(-e \varphi_T / kT),$$

оксиды получают при разложении карбонатов щелочноземельных металлов, нанесенных на металлический керн катода, в процессе его прогрева непосредственно в вакуумном приборе, в котором катод должен работать. Оксидные низкотемпературные катоды наиболее широко применяются в электровакуумных приборах. В высокотемпературных оксидных катодах с рабочей температурой 1400—1900 К используются оксиды иттрия и тория. Такие катоды применяются в магнетронах.

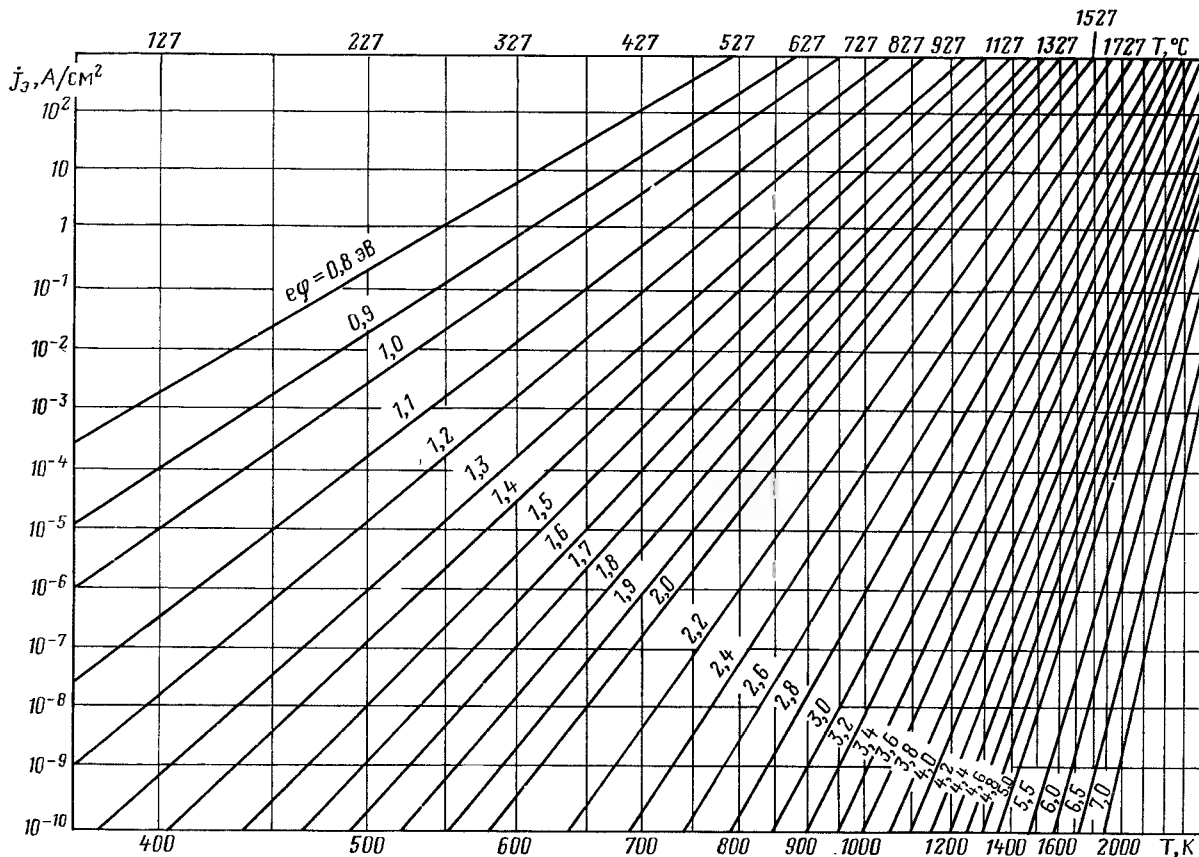


Рис. 25.3. Зависимости плотности тока ТЭ от температуры и работы выхода катода [6]

где  $\bar{r}$  — коэффициент отражения электронов от потенциального барьера, усредненный по энергиям электронов;  $A_0 = 4 \pi m e k^2 / h^3 = 120,4 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$  — универсальная постоянная, одинаковая для всех твердых тел;  $\varphi_T = \varphi_0 + (d\varphi/dT)T$ ;  $\varphi_0$  — значение  $\varphi$ , В, при  $T=0$ ;  $e=1,60 \times 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона;  $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$  — постоянная Больцмана (рис. 25.3).

Термоэмиссионный катод (термокатод) — элемент электровакуумного или газонаполненного прибора, являющийся источником электронов. Основные типы термоэмиссионных катодов: металлические, оксидные, металлопористые (распределительные), металлосплавные и боридные.

Металлические термокатоды, изготавливаемые из торированного вольфрама, в настоящее время находят ограниченное применение.

Оксидный термокатод — смесь оксидов металлов, нанесенная на металлический керн. В низкотемпературных катодах, работающих в интервале температур от 900 до 1300 К, используются смеси оксидов щелочноземельных металлов — бария, кальция и стронция. Эти

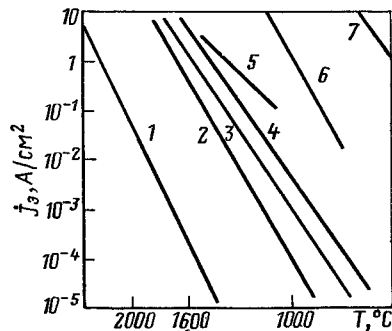


Рис. 25.4. Зависимость плотности тока ТЭ от температуры для различных катодов [7]:

1 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — оксид тория; 4 — гексаборид лантана (см. также [8]); 5 — оксидно-иттриевый катод с присадками вольфрама, молибдена или тантала [11]; 6 — L-катод; 7 — оксидный катод

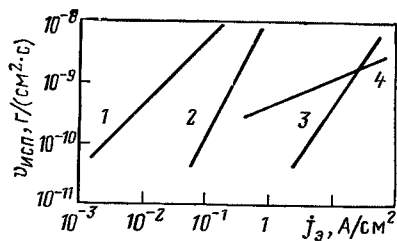


Рис. 25.5. Зависимость скорости испарения от плотности тока ТЭ для различных материалов [7]:

1 — вольфрам; 2 — торированный вольфрам; 3 — пропитанный катод; 4 — гексаборид лантана [7, 8]

Металлопористый вольфрамово-бариевый термокатод — пористая вольфрамовая губка, внешняя поверхность которой покрыта пленкой бария, снижающей работу выхода и обеспечивающей получение большого тока ТЭ. В процессе работы пленка бария разрушается вследствие ионной бомбардировки и под воздействием газов, выделяющихся из деталей приборов. Возобновление пленки происходит вследствие поступления бария из вольфрамовой губки при термическом разложении содержащегося в ней активного вещества. Существует несколько типов металлопористых термокатодов: камерные, или *L*-катоды — состоят из камеры, заполненной активным веществом — карбонатом бария-стронция — и закрытой стенкой-губкой, наружная сторона которой является эмиттирующей поверхностью; пропитанные — пористая губка из вольфрама, рения или молибдена, поры которой заполнены активным веществом — алюминием или вольфрамом бария-кальция; и прессованные. Последние изготавливаются в виде таблеток или керамических трубок, путем спрессовывания смеси из порошков оксида иттрия или оксида тория и порошков тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, тантал). Катоды этого типа так же, как и оксидно-ториевый, работают при температурах 1700—1800°С и предназначены для использования в СВЧ-приборах, главным образом в магнетронах.

Боридный термокатод — катод на основе металлоподобных соединений типа  $\text{MeB}_6$ , где  $\text{Me}$  — щелочноземельный, редкоземельный металлы или торий. В качестве термокатада наиболее широко применяется гексаборид лантана, реже — гексабориды иттрия и гадолиния и диборид хрома. Покрытие оксидного слоя тонкой пленкой осмия понижает работу выхода катода и увеличивает его эмиссионную способность. Термоэмиссионные катоды из гексаборида лантана работают при температуре 1650 К и обеспечивают получение плотности тока ТЭ до 50 А/см². Высокая механическая прочность и устойчивость таких катодов к ионной бомбардировке позволяет использовать их в режиме термополевой эмиссии (при напряженности внешнего электрического поля  $10^6$  В/см значительная часть эмиссионного тока обусловлена туннелированием электронов сквозь барьер). В этом режиме катод из гексаборида лантана при температуре 1400—1500 К может эмитировать ток с плотностью до 1000 А/см². Катоды из гексаборида лантана не отравляются на воздухе и устойчиво работают в относительно плохом вакууме. Срок их службы не зависит от давления остаточных газов в приборе до давлений порядка  $10^{-2}$  Па. Эти катоды используются в ускорителях и различных вакуумных устройствах.

Основные характеристики термокатодов — работа выхода  $\phi$ ; рабочая температура  $T$ ; плотность тока насыщения ТЭ  $j_s$  и ее зависимость от температуры; скорость испарения активного вещества при рабочей температуре  $v_{\text{исп}}$ ; эффективность катода  $\eta$  — отношение плотности тока ТЭ к мощности, затрачиваемой на нагревание катода; критерий качества катода  $q$  — отношение работы выхода к теплоте испарения активного вещества при данной температуре; толщина активного слоя  $d$  (для однородных катодов — диаметр). Характеристики различных термокатодов приведены в табл. 25.5—25.14 и на рис. 25.4—25.11.

Таблица 25.5 Термоэмиссионные свойства вольфрамового термокатада [6] (чистый вольфрам,  $\rho = 19,3$  г/см³,  $\phi = 4,54$  эВ)

| $T, \text{ К}$ | $j_s, \text{ А/см}^2$ | $v_{\text{исп}}, \text{ г/(см}^2\cdot\text{с)}$ | $j_s/v_{\text{исп}}, \text{ Кл/г}$ | $d_1, \text{ мм/ч}^*$ | Срок службы, ч       |                    |                  |
|----------------|-----------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|------------------|
|                |                       |                                                 |                                    |                       | $d = 0,1 \text{ мм}$ | $d = 1 \text{ мм}$ | массивный катод  |
| 2100           | $3,9 \cdot 10^{-3}$   | $1,6 \cdot 10^{-12}$                            | $2,5 \cdot 10^9$                   | $3,0 \cdot 10^{-9}$   | $1 \cdot 10^6$       | $1 \cdot 10^7$     | $1 \cdot 10^8$   |
| 2200           | $1,3 \cdot 10^{-2}$   | $1,2 \cdot 10^{-11}$                            | $1,1 \cdot 10^9$                   | $2,3 \cdot 10^{-8}$   | $1,4 \cdot 10^5$     | $1,4 \cdot 10^6$   | $1,4 \cdot 10^7$ |
| 2300           | $4,1 \cdot 10^{-2}$   | $7,8 \cdot 10^{-11}$                            | $5,0 \cdot 10^8$                   | $1,5 \cdot 10^{-7}$   | $2 \cdot 10^4$       | $2 \cdot 10^5$     | $2,2 \cdot 10^6$ |
| 2400           | $1,2 \cdot 10^{-1}$   | $4,4 \cdot 10^{-10}$                            | $2,7 \cdot 10^8$                   | $8,2 \cdot 10^{-7}$   | $3 \cdot 10^3$       | $3 \cdot 10^4$     | $3 \cdot 10^5$   |
| 2500           | $3,0 \cdot 10^{-1}$   | $2,0 \cdot 10^{-9}$                             | $1,5 \cdot 10^8$                   | $3,7 \cdot 10^{-6}$   | 830                  | 8300               | $8 \cdot 10^4$   |
| 2600           | $7,0 \cdot 10^{-1}$   | $8,8 \cdot 10^{-9}$                             | $8,0 \cdot 10^7$                   | $1,6 \cdot 10^{-5}$   | 180                  | 1800               | $1,8 \cdot 10^4$ |
| 2700           | 1,6                   | $3,2 \cdot 10^{-8}$                             | $5,0 \cdot 10^7$                   | $6,0 \cdot 10^{-5}$   | 50                   | 500                | $5 \cdot 10^3$   |
| 2800           | 3,5                   | $1,1 \cdot 10^{-7}$                             | $3,1 \cdot 10^7$                   | $2,1 \cdot 10^{-4}$   | 14                   | 140                | 1440             |
| 2900           | 7,3                   | $3,5 \cdot 10^{-7}$                             | $2,1 \cdot 10^7$                   | $6,5 \cdot 10^{-4}$   | 4,6                  | 46                 | 460              |
| 3000           | 14,0                  | $9,7 \cdot 10^{-7}$                             | $1,7 \cdot 10^7$                   | $1,8 \cdot 10^{-3}$   | 1,7                  | 17                 | 170              |

\* Толщина слоя вещества, испаряющегося за 1 час при температуре  $T$ .

Рис. 25.8. Термоэлектронная эмиссия пяти тугоплавких металлов и сплава вольфрам — молибден (в равных массовых количествах) в парах цезия [9]: температура жидкой фазы цезия 200°С. Наклонные прямые — линии постоянной работы выхода

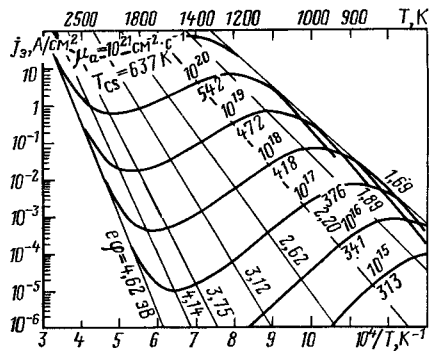


Рис. 25.6. Термоэлектронная эмиссия поликристаллического вольфрама в парах цезия [9]: для каждой кривой снизу указана температура жидкой фазы цезия  $T_{cs}$  и сверху плотность потока атомов цезия на поверхность катода  $\mu_a$ . Наклонные прямые — линии постоянной работы выхода

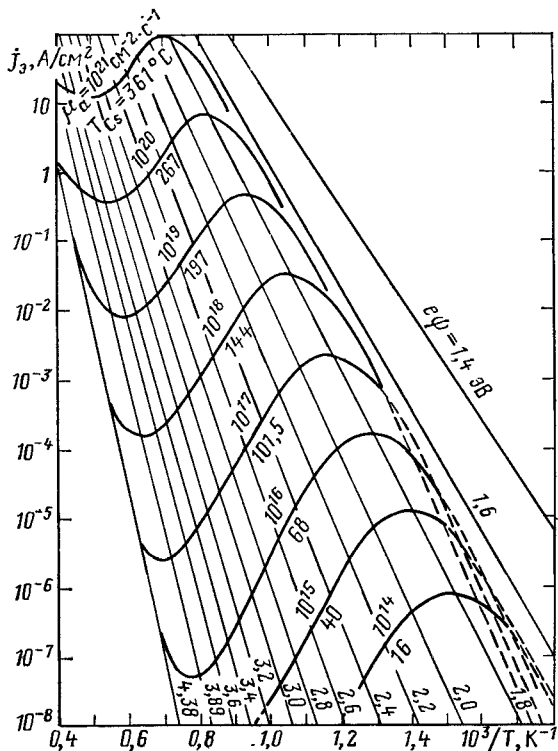


Рис. 25.7. Термоэлектронная эмиссия поликристаллического молибдена в парах цезия [9]. Обозначения те же, что на рис. 25.6.

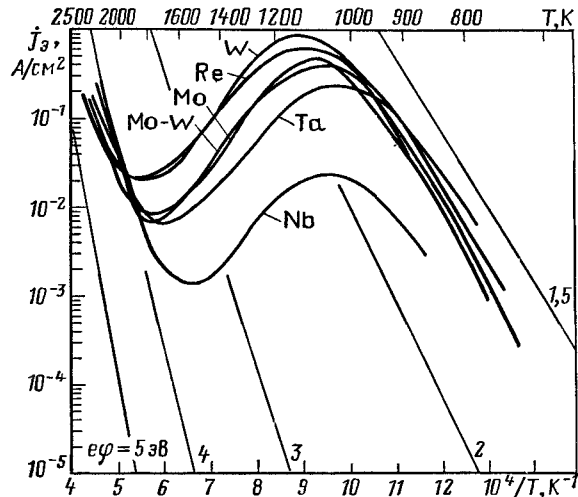


Таблица 25.6. Термоэмиссионные свойства металлоюрнстого вольфрамово-бариевого термокатада ( $L$ -катод) [6] ( $e\varphi = 1,8 \div 2,0$  эВ, количество ВаО 30 мг/см²)

| $T, K$ | $j_{\text{э}}, A/cm^2$ | $v_{\text{исп}}, \text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ | $j_{\text{э}}/v_{\text{исп}}, \text{Кл}/\text{г}$ | $d_1 \text{ ч}, \text{мм}/\text{ч}$ | Срок службы*, ч |
|--------|------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| 800    | $1 \cdot 10^{-5}$      | —                                                       | —                                                 | —                                   | —               |
| 900    | $3 \cdot 10^{-4}$      | —                                                       | —                                                 | —                                   | —               |
| 1000   | $5 \cdot 10^{-3}$      | —                                                       | —                                                 | —                                   | —               |
| 1100   | $6 \cdot 10^{-2}$      | —                                                       | —                                                 | —                                   | —               |
| 1200   | 0,4                    | —                                                       | —                                                 | —                                   | —               |
| 1300   | 2                      | $1,7 \cdot 10^{-10}$                                    | $1,2 \cdot 10^{10}$                               | $6 \cdot 10^{-4}$                   | $5 \cdot 10^4$  |
| 1400   | 10                     | $2 \cdot 10^{-9}$                                       | $5 \cdot 10^9$                                    | $7 \cdot 10^{-3}$                   | 4300            |
| 1500   | 30                     | $1,7 \cdot 10^{-8}$                                     | $1,8 \cdot 10^8$                                  | $6 \cdot 10^{-2}$                   | 500             |
| 1600   | 90                     | $1 \cdot 10^{-7}$                                       | $9 \cdot 10^8$                                    | 0,4                                 | 75              |
| 1700   | 300                    | $5,5 \cdot 10^{-7}$                                     | $5,5 \cdot 10^8$                                  | 2                                   | 15              |

\* Срок службы определяется запасом активного вещества; данные приведены для стандартного катода [6].

Таблица 25.7. Термоэмиссионные свойства ВаО-SrO-оксидного термокатада [6] ( $\bar{\rho} = 5,5 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $e\varphi = 1,6$  эВ, толщина активного слоя 20 мкм ( $10 \text{ мг}/\text{см}^2$ ), керн никелевый,  $d_{\text{кр}}^* = 6 \text{ мкм}$ )

| $T, K$ | $j_{\text{э}}, A/cm^2$ | $v_{\text{исп}}^*, \text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ | $j_{\text{э}}/v_{\text{исп}}^*, \text{Кл}/\text{г}$ | $d_{14}^*, \text{мм}/\text{ч}$ | Срок службы, ч |
|--------|------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 500    | $10^{-5}$              | —                                                         | —                                                   | —                              | —              |
| 600    | $4 \cdot 10^{-4}$      | —                                                         | —                                                   | —                              | —              |
| 700    | $7 \cdot 10^{-3}$      | —                                                         | —                                                   | —                              | —              |
| 800    | $4 \cdot 10^{-2}$      | —                                                         | —                                                   | —                              | —              |
| 900    | 0,4                    | —                                                         | —                                                   | —                              | —              |
| 1000   | 3,0                    | $5 \cdot 10^{-11}$                                        | $6 \cdot 10^{10}$                                   | $3,2 \cdot 10^{-7}$            | 5000           |
| 1100   | 12                     | $2 \cdot 10^{-9}$                                         | $6 \cdot 10^9$                                      | $1,3 \cdot 10^{-5}$            | 115            |
| 1200   | 50                     | $8 \cdot 10^{-8}$                                         | $6 \cdot 10^8$                                      | $5,2 \cdot 10^{-4}$            | 3              |
| 1300   | 200                    | $1 \cdot 10^{-6}$                                         | $2 \cdot 10^8$                                      | $6,5 \cdot 10^{-3}$            | 0,23           |

\*1 Минимальная толщина активного слоя, при которой термокатод сохраняет работоспособность.  
\*2 Значения для ВаО. Для ВаО — SrO-термокатодов скорость испарения несколько меньше.

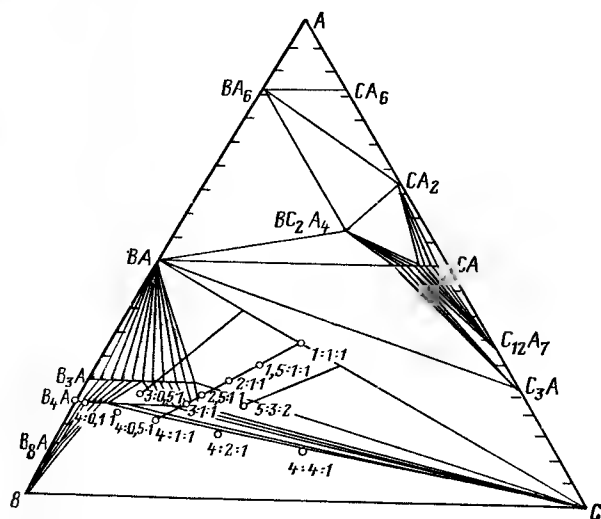


Рис. 25.9. Фазовая диаграмма оксидного катода (система BaO—CaO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [10], определенная при T=1250°C: В≡BaO; С≡CaO; А≡Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Существенные композиции отмечены кружками, а их молярные отношения даны как В : С : А

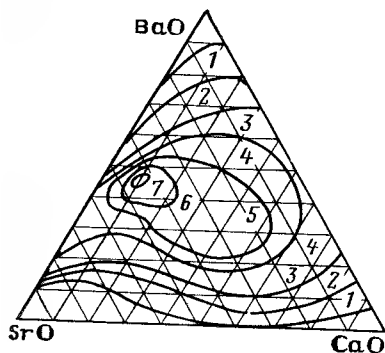


Рис. 25.10. Эмиссионная способность оксидов разного состава [12]: цифры у кривых — значения импульсного тока, А/см<sup>2</sup>

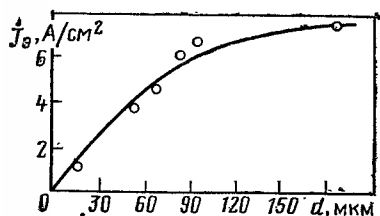


Рис. 25.11. Зависимость плотности стабильного тока ГЭ эмиссии BaO—SrO-оксидного катода от толщины слоя оксида d [13]

Таблица 25.8. Рекомендуемые режимы работы оксидных катодов [2]

| $j_g$ , А/см <sup>2</sup> | T, К | Предельный срок службы, ч |
|---------------------------|------|---------------------------|
|---------------------------|------|---------------------------|

Непрерывный режим токоотбора

|      |           |        |
|------|-----------|--------|
| 0,05 | 1000—1040 | 20 000 |
| 0,15 | 1000—1070 | 5 000  |
| 0,20 | 1070—1100 | 3 000  |
| 0,30 | 1070—1100 | 2 000  |

Импульсный режим токоотбора

|        |           |        |
|--------|-----------|--------|
| 3,0    | 1000—1040 | 10 000 |
| 5,0    | 1000—1040 | 5 000  |
| 6,0*1  | 1070—1100 | 3 000  |
| 10,0*1 | 1070—1100 | 2 000  |
| 2,5*2  | 1070—1100 | 3 000  |
| 4,0*2  | 1070—1100 | 2 000  |

\*1 Длительность импульса — микросекунды.

\*2 Длительность импульса — сотни микросекунд.

Таблица 25.9. Термоэмиссионные характеристики и срок службы прессованных металлопористых оксидно-никелевых катодов [7]

| T, К | $j_g$ , А/см <sup>2</sup> | Срок службы, ч | Режим отбора тока |
|------|---------------------------|----------------|-------------------|
| 1200 | 0,5                       | 5000           | Стационарный      |
| 1220 | 0,5                       | 5000           | »                 |
| 1270 | 1                         | 5000           | »                 |
| 1340 | 3                         | 3000           | »                 |

Таблица 25.10. Термоэмиссионные константы боридов, позволяющие рассчитать  $\varphi_T$  по формуле  $\varphi_T = \varphi_0 + (\partial\varphi/\partial T) T$  и коэффициент вторичной эмиссии [7]

| Соединение       | $e\varphi_0$ , эВ | $e\partial\varphi/\partial T$ , 10 <sup>-4</sup> эВ/К | Коэффициент вторичной эмиссии $\sigma$ |
|------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| BaB <sub>6</sub> | 3,45              | 7,5                                                   | —                                      |
| CeB <sub>6</sub> | 2,59              | 2,3                                                   | 0,68                                   |
| CrB <sub>2</sub> | 3,36              | —                                                     | 0,77                                   |
| DyB <sub>6</sub> | 3,53              | 1,5                                                   | 0,8                                    |
| ErB <sub>6</sub> | 3,37              | 2,3                                                   | —                                      |

| Соединение                                                    | $e\varphi$ , эВ | $e\varphi/\partial T$ ,<br>$10^{-4}$ эВ/К | Коэффициент<br>вторичной<br>эмиссии $\sigma$ |
|---------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| EuB <sub>6</sub>                                              | 4,9             | —                                         | —                                            |
| GdB <sub>6</sub>                                              | 2,05            | 4,0                                       | 0,8                                          |
| HoB <sub>6</sub>                                              | 3,42            | 1,6                                       | 0,7                                          |
| LaB <sub>6</sub>                                              | 2,68            | 1,4                                       | 0,95                                         |
| LuB <sub>6</sub>                                              | 3,0             | 1,6                                       | 0,8                                          |
| MnB <sub>2</sub>                                              | 4,14            | —                                         | —                                            |
| NdB <sub>6</sub>                                              | 3,97            | 1,6                                       | 0,8                                          |
| PrB <sub>6</sub>                                              | 3,46            | 2,5                                       | 0,8                                          |
| ScB <sub>6</sub>                                              | 2,96            | 2,3                                       | 0,58                                         |
| SrB <sub>6</sub>                                              | 2,67            | 2,5                                       | —                                            |
| TbB <sub>6</sub>                                              | 3,26            | —                                         | —                                            |
| ThB <sub>6</sub>                                              | 2,92            | 2,0                                       | —                                            |
| TiB <sub>2</sub>                                              | 3,88            | —                                         | 0,82                                         |
| T <sub>m</sub> B <sub>6</sub> + T <sub>m</sub> B <sub>4</sub> | 3,38            | —                                         | —                                            |
| VB <sub>2</sub>                                               | 3,95            | —                                         | 0,8                                          |
| YB <sub>6</sub>                                               | 2,22            | 2,18                                      | 1,0                                          |
| YbB <sub>6</sub>                                              | 3,13            | 3,0                                       | —                                            |
| ZrB <sub>2</sub>                                              | 3,67            | 2,0                                       | 0,85                                         |

Таблица 25.11. Термоэмиссионные свойства  
гексаборида лантана LaB<sub>6</sub> [6, 8] ( $\rho = 2,61$  г/см<sup>3</sup>,  
 $e\varphi = 2,68$  эВ)

| T, К | $i_a$ , А/см <sup>2</sup> | $\nu_{\text{исп}}$ , Г/(см <sup>2</sup> ·с) | $i_a / \nu_{\text{исп}}$ , Кл/Г | d, мм                | Срок службы ка-<br>тода с косвенным<br>подогревом, ч                    |                                              |
|------|---------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|      |                           |                                             |                                 |                      | Точечный мо-<br>нокристалли-<br>ческий,<br>$d_{\text{кр}} \approx 3$ мм | Массивный,<br>$d_{\text{кр}} \approx 100$ мм |
| 1600 | 0,4                       | $1 \cdot 10^{-11}$                          | $4,0 \cdot 10^{10}$             | $1,4 \cdot 10^{-7}$  | $2 \cdot 10^4$                                                          | $7 \cdot 10^5$                               |
| 1700 | 1,0                       | $1 \cdot 10^{-10}$                          | $1,0 \cdot 10^{10}$             | $1,4 \cdot 10^{-6}$  | 2150                                                                    | $7 \cdot 10^4$                               |
| 1800 | 3,0                       | $1 \cdot 10^{-9}$                           | $3,0 \cdot 10^9$                | $1,4 \cdot 10^{-5}$  | 215                                                                     | $7 \cdot 10^3$                               |
| 1900 | 8,5                       | $9 \cdot 10^{-9}$                           | $9,5 \cdot 10^8$                | $1,2 \cdot 10^{-4}$  | 25                                                                      | 800                                          |
| 2000 | 25                        | $7 \cdot 10^{-8}$                           | $3,6 \cdot 10^8$                | $1,0 \cdot 10^{-3}$  | 3                                                                       | 100                                          |
| 2100 | 100                       | $6 \cdot 10^{-7}$                           | $1,7 \cdot 10^8$                | $8,3 \cdot 10^{-3}$  | 0,35                                                                    | 12                                           |
| 2200 | 400                       | $4 \cdot 10^{-6}$                           | $1,0 \cdot 10^8$                | $5,55 \cdot 10^{-2}$ | 0,05                                                                    | 1,8                                          |

Таблица 25.12. Термоэмиссионные свойства  
прессованных термокатодов различного состава [7]

| Катод (массовый состав, %)                                     | T, °C | $i_a$ , А/см <sup>2</sup> |                            |
|----------------------------------------------------------------|-------|---------------------------|----------------------------|
|                                                                |       | Импульс-<br>ный режим     | Стацио-<br>нарный<br>режим |
| ThH <sub>2</sub> + W <sub>2</sub> C + W (0,5 +<br>+ 10 + 89,5) | 1700  | —                         | —                          |
| W + ThO <sub>2</sub> (96 + 4)                                  | 1500  | 0,8                       | —                          |
|                                                                | 1600  | 2,0                       | —                          |
| W + ThO <sub>2</sub> + B (95 + 4 + 1)                          | 1370  | —                         | 0,4                        |

| Катод (массовый состав, %)                                                                    | T, °C | $i_a$ , А/см <sup>2</sup>  |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|
|                                                                                               |       | Импульс-<br>ный ре-<br>жим | Стацио-<br>нарный<br>режим |
| W + ThO <sub>2</sub> + B (97,5 + 2 + 0,5)                                                     | 1370  | —                          | 0,4                        |
| W + La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70 + 30)                                                  | 1300  | —                          | 1,4                        |
| W + Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70 + 30)                                                  | 1300  | —                          | 0,5                        |
| W + Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70 + 30)                                                  | 1400  | —                          | 0,4                        |
| W + [75% Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +<br>+ 25% La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ] (70 + 30) | 1400  | —                          | 0,86                       |
| W + Th (пропитанный)                                                                          | 1600  | —                          | 2—3                        |

Таблица 25.13. Высокотемпературные  
термокатоды [14]

| Катод                                        | T, °C | $i_a$ , А/см <sup>2</sup> | Срок<br>службы, ч |
|----------------------------------------------|-------|---------------------------|-------------------|
| Mo — La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 1580  | 7                         | 7000              |
| Mo — C — La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> — Pt | 1570  | 5                         | —                 |
| Ir — La                                      | 1430  | 4                         | 4500              |
| Re — LaB <sub>6</sub>                        | 1400  | 3                         | 1500              |
| W — Re — Y                                   | 1440  | 1                         | 800               |
| W — Re — Nd                                  | 1730  | 2                         | 500               |
| ZrC — W                                      | 1780  | 1                         | 10 000            |
| ZrC — W, ZrC — Mo                            | 2030  | 1                         | 9000              |

Таблица 25.14. Работа выхода  $e\varphi$ , теплота  
испарения  $Q$  и критерий качества  $q = e\varphi/Q$  термокатодов [7]

| Тип катода               | $e\varphi$ , эВ | Q, эВ | $e\varphi/Q$ | T, К, при долго-<br>вечности |        |
|--------------------------|-----------------|-------|--------------|------------------------------|--------|
|                          |                 |       |              | 10 000 ч                     | 1000 ч |
| Вольфрамовый             | 4,54            | 8,0   | 0,57         | 2300*                        | 2500*  |
| Танталовый               | 4,2             | 7,9   | 0,53         | 2000*                        | 2200*  |
| Ториево-оксид-<br>ный    | 3,2             | 7,6   | 0,42         | 1770                         | 1870   |
| Боридный                 | 2,8             | 6,8   | 0,41         | 1720                         | 1870   |
| Вольфрамово-<br>бариевый | 2,1             | 4,7   | 0,45         | 1300                         | 1420   |
| Оксидный                 | 1,6             | 4,0   | 0,4          | 1030                         | 1100   |

\* Значения ориентировочные, так как долговечность катодов  
прямого накала зависит также от диаметра катода.

## 25.4. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Фотоэлектронная эмиссия (ФЭ) — эмиссия электронов, вызываемая облучением тел электромагнитным излучением [15—21].

Приведем основные законы ФЭ:

1. Фототок в режиме насыщения прямо пропорционален интенсивности падающего излучения.

2. Для каждого вещества существует длинноволновая граница  $\lambda_0$ . При  $\lambda > \lambda_0$  ФЭ не происходит. С длинноволновой границей связана пороговая частота  $\nu_0 = c/\lambda_0$  ( $c$  — скорость света) и пороговая энергия или фотоэлектрическая работа выхода  $h\nu_0$ .

3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлект-

ронов линейно возрастает с частотой падающего излучения и не зависит от его интенсивности.

Эти законы нарушаются при очень больших плотностях потока падающего излучения ( $F \gg 1$  Вт/см<sup>2</sup>), когда становятся существенными многофотонные процессы.

Перечислим основные характеристики фотокатодов:

Квантовый выход  $Y_\lambda = (I_\lambda / e) / (F_\lambda / h\nu)$ , электрон/фотон — число вышедших в вакуум фотоэлектронов, приходящихся на каждый падающий на поверхность фотокатода фотон. Здесь  $I_\lambda$  — фототок насыщения на данной длине волны;  $F_\lambda$  — интенсивность излучения на данной длине волны.

Спектральная чувствительность  $S_\lambda = I_\lambda / F_\lambda = 0,807 Y_\lambda \lambda$ , мА/Вт — фототок насыщения на единицу мощности падающего на фотокатод монохроматического излучения ( $\lambda$  — в нм).

Спектральная характеристика — зависимость  $S_\lambda$  или  $Y_\lambda$  от частоты или длины волны падающего излучения.

Интегральная чувствительность  $S$  — отношение фототока насыщения к потоку излучения стандартного источника света, за который обычно принимают вольфрамовую лампу накаливания с температурой нити 2850 К:

$$S = I/F = \int_0^{\lambda_2} S_\lambda F_\lambda d\lambda / 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda K_\lambda d\lambda.$$

Здесь  $S$  — в мкА/лм;  $S_\lambda$  — в мкА/Вт;  $K_\lambda$  — относительная спектральная чувствительность человеческого глаза ( $K_{\max} = K_{\lambda=555\text{ нм}}$ );  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — граничные длины волн излучения видимого спектра.

Плотность темнового тока  $j_T$  — плотность тока ТЭ неосвещаемого фотокатода при рабочей температуре. Темновой ток — основной источник шума в фотоэлектронных приборах. Среднее квадратическое значение шумового тока в отсутствие излучения дается формулой

$$(i_{\text{ш}}^2)^{1/2} = (2ej_T s \Delta f)^{1/2},$$

где  $s$  — площадь поверхности фотокатода;  $\Delta f$  — ширина полосы частот регистрирующего устройства.

**Фотоэмиссия из металлов.** Пороговая энергия ФЭ из металлов совпадает с работой выхода. ФЭ из металлических фотокатодов при частотах излучения, не очень далеких от пороговой частоты ( $\nu \leq 1,5 \nu_0$ ), хорошо описывается феноменологической теорией Фаулера, согласно которой

$$I = \begin{cases} \alpha A_0 T^2 \exp\left(-\frac{h\nu_0 - h\nu}{kT}\right), & \nu < \nu_0; \\ \alpha \frac{A_0}{2} \left[ \frac{(h\nu - h\nu_0)^2}{k^2} + \frac{\pi^2}{3} T^2 \right], & \nu > \nu_0, \end{cases}$$

где  $\alpha \approx F/h\nu$  — отношение плотности возбужденных светом электронов к плотности нормального электронного газа в эмиттере;  $A_0 = 4\pi e m k^2 / h^3$  — постоянная Ричардсона. Пороговая частота ФЭ  $\nu_0$  строго определена только при  $T=0$ . При  $T>0$  ФЭ наблюдается вблизи порога и при частотах  $\nu < \nu_0$ . Квантовый выход ФЭ из чистых металлических поверхностей в видимой области спектра имеет порядок  $10^{-4}$  электрон/фотон, а при  $h\nu \leq 10$  эВ не превышает  $10^{-2}$  электрон/фотон (рис. 25.12).

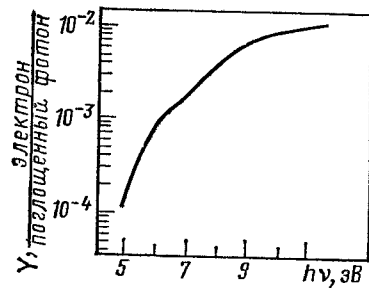


Рис. 25.12. Спектральная характеристика квантового выхода ФЭ с чистой поверхности меди [18]

**Фотоэмиссия из полупроводников.** В полупроводниках ФЭ может быть обусловлена возбуждением электронов из валентной зоны, с уровней примесей, дефектов, поверхностных состояний и из зоны проводимости (в вырожденных полупроводниках  $n$ -типа). Для каждого из этих случаев пороговая частота имеет свое значение. Обычно, если иное не оговорено, под фотоэлектрической работой выхода понимают минимальную энергию фотонов, при которой начинается ФЭ из валентной зоны полупроводника (табл. 25.15). Это значение, как правило, превосходит работу выхода. Спектральная зависимость квантового выхода ФЭ вблизи порога в полупроводниках имеет вид

$$Y \sim (h\nu - h\nu_0)^m,$$

где  $m=1 \div 3$  в зависимости от типа оптических переходов и механизма рассеяния фотоэлектронов. Квантовый выход ФЭ из полупроводников зависит от электронного сродства  $\chi$  — энергии, необходимой для перевода электрона со дна зоны проводимости на уровень вакуума. Все эффективные фотокатоды имеют малое значение  $\chi$ , так что  $\chi/E_g < 1$ . Квантовый выход фотоэмиссии полупроводников с  $\chi/E_g > 1$  мал (рис. 25.13).

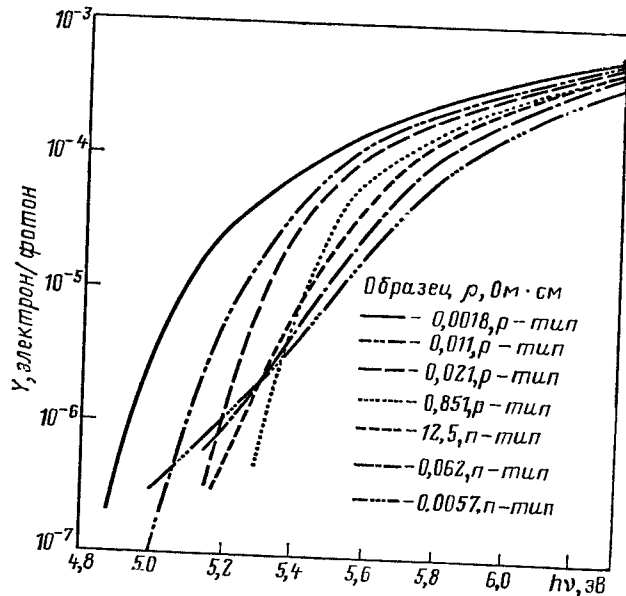


Рис. 25.13. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для образцов кремния  $n$ - и  $p$ -типов с различной степенью легирования  $\chi/E_g \approx 4$  [16]

Снижение работы выхода полупроводников путем адсорбции на их поверхности электроположительных атомов (цезия, бария и других) приводит к уменьшению  $\chi$  и резкому увеличению квантового выхода. В случае GaAs, GaP, Si и ряда других полупроводников совместная адсорбция цезия и кислорода приводит к столь сильному снижению работы выхода, что реализуется условие отрицательного электронного сродства (ОЭС). Полупроводники с ОЭС обладают наибольшим квантовым выходом в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

**Эффективные фотокатоды.** Все эффективные фотокатоды — полупроводники. Металлы имеют высокий квантовый выход (около 0,1 электрон/фотон) только в области  $h\nu > 12$  эВ и обычно при наличии на их поверхности оксидных пленок.

Эффективными фотокатодами для области спектра  $\lambda < 200$  нм ( $h\nu > 6$  эВ) являются щелочногалогенидные соединения (CsI, CsBr и другие), иодид меди и галогенидные соединения серебра. Высокий квантовый выход в области  $\lambda = 200 \div 350$  нм получен на теллуриде цезия ( $\text{Cs}_2\text{Te}$ ) и теллуриде рубидия ( $\text{Rb}_2\text{Te}$ ). Следует отметить, что эти фотокатоды относятся к категории так называемых солнечно-слепых, т. е. фотокатодов, чувствительных в ультрафиолетовой области спектра, но не реагирующих на излучение Солнца. Рассмотренные ниже фотокатоды для видимой области спектра имеют высокий квантовый выход и в ультрафиолетовой области.

Фотокатоды, чувствительные в видимой области спектра, представляют собой антимониды щелочных металлов. Некоторые из них ( $\text{CsNa}_2\text{KSb}$ ) чувствительны и в ближней инфракрасной области спектра, вплоть до  $\lambda = 850 \div 900$  нм. До последнего времени единственным фотокатодом в области  $\lambda = 900 \div 1100$  нм был Ag—O—Cs-фотокатод. В настоящее время разработан новый класс фотокатодов — с ОЭС. Фотокатоды с ОЭС представляют собой сильнолегированные полупроводники *p*-типа (GaAs, Si, твердые растворы GaInAs, InGaAsP и другие), работа выхода которых сильно снижена адсорбцией цезия и кислорода, так что уровень вакуума находится ниже дна зоны проводимости в полупроводнике. Они обладают наивысшей чувствительностью в красной и инфракрасной областях спектра.

В области  $\lambda > 1,1$  мкм высоким квантовым выходом обладают только фотокатоды на основе полупроводниковых гетероструктур с внешним смещением (InGaAs—InP—Ag—CsO). Длинноволновая граница таких фотокатодов определяется шириной запрещенной зоны узкозонного полупроводника (InGaAs), в котором происходит поглощение света. Сильное электрическое поле переводит фотоэлектроны из InGaAs в верхний слой InP и увеличивает их энергию до значения, превышающего уровень вакуума. Фотокатоды такого типа обладают чувствительностью в области  $\lambda$  до 1,7 мкм. В табл. 25.16, 25.17 и на рис. 25.14—25.26 приведены характеристики наиболее распространенных фотокатодов.

Таблица 25. 15. Ширина запрещенной зоны  $E_g$ , сродство к электрону  $\chi$  и порог фотоэмиссии  $h\nu_0$  различных полупроводниковых материалов [16]

| Материал        | $E_g$ , эВ | $\chi$ , эВ | $h\nu_0$ , эВ |
|-----------------|------------|-------------|---------------|
| Антимонид:      |            |             |               |
| галлия          | 0,7        | 4,1         | 5,5           |
| индия           | 0,2        | 4,6         | 4,8           |
| магния          | 0,8        | 3,0         | 3,8           |
| Арсенид галлия  | 1,4        | 4,1         | 5,5           |
| Арсенид индия   | 0,4        | 4,9         | 5,3           |
| Аурит цезия     | 2,6        | 1,4         | 4             |
| Бромид серебра  | 2,5        | 3,5         | 6             |
| Германий        | 0,7        | 4,2         | 4,9           |
| Иодид:          |            |             |               |
| калия           | 6,2        | 1,1         | 7,3           |
| лития           | 5,9        | 1,4         | 7,3           |
| меди            | 3          | 3           | 6             |
| натрия          | 5,8        | 1,5         | 7,3           |
| рубидия         | 6,1        | 1,2         | 7,3           |
| цезия           | 6,3        | 0,1         | 6,4           |
| Карбид кремния: |            |             |               |
| гексагональный  | 2,9        | 4,1         | 7             |
| кубический      | 2,2        | 4,8         | 7             |

Продолжение табл. 25. 15

| Материал       | $E_g$ , эВ | $\chi$ , эВ | $h\nu_0$ , эВ |
|----------------|------------|-------------|---------------|
| Кремний        | 1,1        | 4           | 5,1           |
| Оксид бария    | 3,7        | 1,3         | 5             |
| Оксид магния   | 8,7        | 1           | 10            |
| Селен          | 1,8        | 4,2         | 6             |
| Селенид кадмия | 1,7        | 5,3         | 7             |
| Сульфид кадмия | 2,4        | 3,8—4,8     | 6,2—7,2       |
| Сульфид свинца | 0,4        | 4,2         | 4,6           |
| Теллурид       | 0,3        | 4,6         | 4,9           |
| Теллурид:      |            |             |               |
| висмута        | 0,1        | 5,2         | 4,3           |
| кадмия         | 1,5        | 4,4         | 5,9           |
| свинца         | 0,3        | 4,7         | 5             |
| рубидия        | 3,3        | < 0,5       | 3,7           |
| цезия          | 3,3        | < 0,5       | 3,5           |
| Титанат бария  | 2,7        | 2,6         | 5,3           |
| Фторид лития   | 12         | 1           | 13            |
| Фосфид индия   | 1,3        | 4,4         | 5,7           |
| Хлорид серебра | 3          | 3           | 6             |

Таблица 25.16. Свойства фотокатодов на основе антимонидов щелочных металлов [15, 16, 40, 41]

| Фотокатод               | Кристаллическая структура | $Y_m$     | $\lambda_0$ , нм | $S$ , мкА/лм | $E_g$ , эВ | $\chi$ , эВ | Тип проводимости | $j_T$ , А/см <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------------------------|-----------|------------------|--------------|------------|-------------|------------------|---------------------------|
| Li <sub>3</sub> Sb      | Гексагональная            | —         | 320              | —            | 1,0        | 2,9         | <i>n</i>         | —                         |
| Na <sub>3</sub> Sb      | »                         | 0,02      | 330              | —            | 1,1        | 2,5         | <i>n</i>         | —                         |
| K <sub>3</sub> Sb       | Кубическая                | >0,07     | 550              | 12           | 1,4        | 0,9         | <i>p</i>         | —                         |
| Rb <sub>3</sub> Sb      | Гексагональная            | 0,07      | 460              | 2            | 1,1        | 1,6         | <i>n</i>         | —                         |
| Cs <sub>3</sub> Sb      | Кубическая                | 0,10      | 580              | 25           | 1,0        | 1,2         | <i>p</i>         | —                         |
| Na <sub>2</sub> KSb     | »                         | 0,15—0,25 | 620—700          | 40—80        | 1,6        | 0,45        | <i>p</i>         | 10 <sup>-16</sup>         |
| K <sub>2</sub> CsSb     | »                         | 0,30      | 600—670          | 30—60        | 1,0        | 1,0         | <i>p</i>         | 10 <sup>-17</sup>         |
| K <sub>2</sub> CsSb (O) | »                         | 0,30      | 650—700          | 50—100       | 1,0        | 1,1         | <i>p</i>         | 10 <sup>-17</sup>         |
| CsNa <sub>2</sub> KSb   | »                         | 0,35      | 780              | 130          | 1,0        | <1,1        | <i>p</i>         | 10 <sup>-16</sup>         |
| Rb <sub>2</sub> CsSb    | »                         | 0,30—0,40 | 870—940          | 300          | 1,4        | ≈0          | <i>p</i>         | 10 <sup>-16</sup>         |
|                         | »                         | 0,30      | 680—750          | 130          | 1,45       | 0,2         | —                | 10 <sup>-17</sup>         |

Таблица 25.17. Параметры основных фотокатодов для видимой и ближней инфракрасной областей спектра [16, 18]

| Фотокатод                                 | $\lambda_0$ , нм | $Y_m$    | $S_{cp}$ , мкА/лм | $S_m$ , мкА/лм | $j_T$ , А/см <sup>2</sup>             |
|-------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|----------------|---------------------------------------|
| Cs <sub>3</sub> Sb                        | 620—700          | 0,2—0,25 | 40—80             | 120            | 10 <sup>-16</sup> — 10 <sup>-15</sup> |
| K <sub>2</sub> CsSb                       | 650—700          | 0,3—0,4  | 55—65             | 200            | 10 <sup>-17</sup>                     |
| CsNa <sub>2</sub> KSb                     | 900—940          | 0,3—0,4  | 200—250           | 450            | 10 <sup>-16</sup>                     |
| Ag—O—Cs                                   | 1200             | 0,005    | 20—40             | 70             | 10 <sup>-13</sup> — 10 <sup>-11</sup> |
| GaAsP—Cs—O                                | 680              | 0,5      | 200—300           | 375            | <10 <sup>-14</sup>                    |
| GaAs—Cs—O                                 | 900              | 0,3      | 800—1400          | 2150           | 10 <sup>-14</sup> — 10 <sup>-16</sup> |
| InGaAsP—Cs—O                              | 1100—1150        | 0,2      | 200—500           | 1640           | 10 <sup>-11</sup> — 10 <sup>-13</sup> |
| In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As— | 1700             | 0,08     | —                 | —              | —                                     |
| —InP—Ag—                                  |                  |          |                   |                |                                       |
| —Cs—O                                     |                  |          |                   |                |                                       |

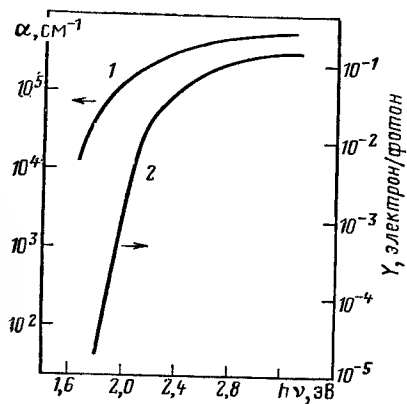


Рис. 25.14. Спектральные характеристики коэффициента поглощения  $\alpha$  (1) и квантового выхода ФЭ (2) для фотокатода из Cs<sub>3</sub>Sb [16]

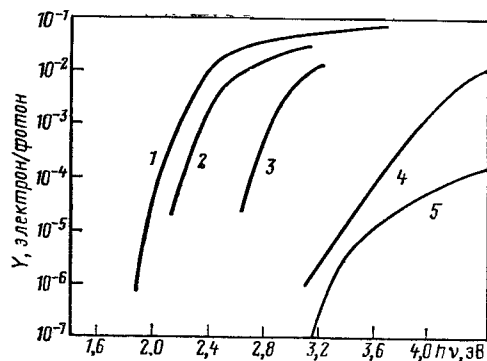


Рис. 25.15. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов на основе антимонидов щелочных металлов:

1 — Rb<sub>3</sub>Sb; 2 — K<sub>3</sub>Sb с кубической структурой; 3 — K<sub>3</sub>Sb с гексагональной структурой; 4 — Na<sub>3</sub>Sb; 5 — Li<sub>3</sub>Sb [16]



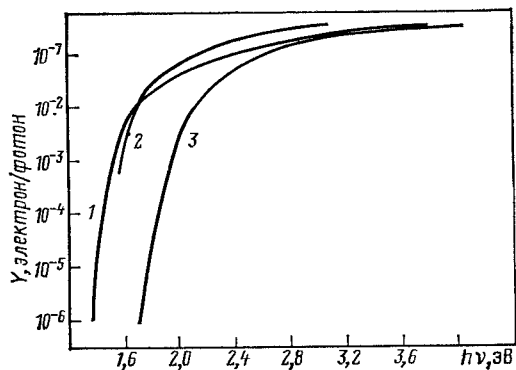


Рис. 25.16. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для многощелочного и бищелочных фотока-  
тодов:

1 —  $\text{CsNa}_2\text{KSb}$ ; 2 —  $\text{K}_2\text{CsSb(O)}$ ; 3 —  $\text{Na}_2\text{KSb}$  [16]

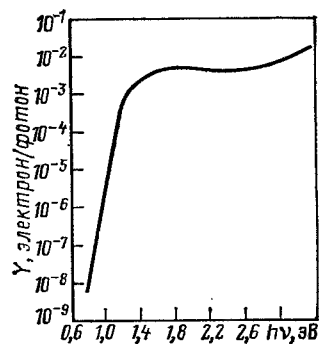


Рис. 25.17. Спектральная ха-  
рактеристика квантового вы-  
хода ФЭ для фотокаатода из  
 $\text{Ag-O-Cs}$  [16]

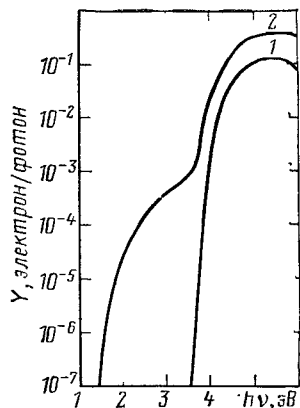


Рис. 25.18. Спектральные  
характеристики кванто-  
вого выхода ФЭ для фо-  
токаатода из  $\text{Cs}_2\text{Te}$  без из-  
бытка цезия (1) и с из-  
бытком цезия (2) [16]

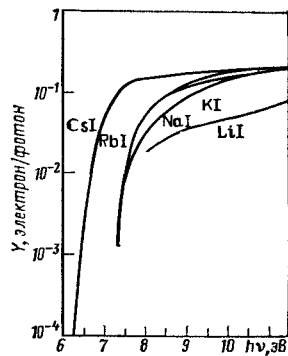


Рис. 25.19. Спектральные  
характеристики кванто-  
вого выхода ФЭ для  
йодидов щелочных ме-  
таллов [16]

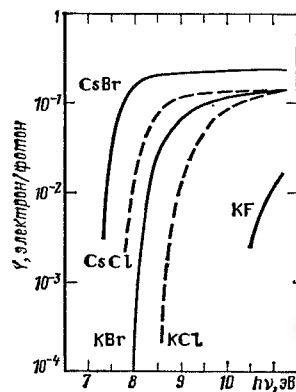


Рис. 25.20. Спектральные  
характеристики кванто-  
вого выхода ФЭ для не-  
которых щелочногалогид-  
ных соединений [16]

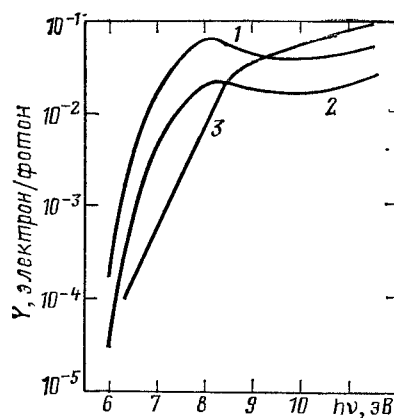


Рис. 25.21. Спектральные характеристики квантового  
выхода ФЭ для некоторых галогидных соединений се-  
ребра:

1 — монокристалл  $\text{AgBr}$ ; 2 — плавный  $\text{AgBr}$ ; 3 —  $\text{AgCl}$  [16]

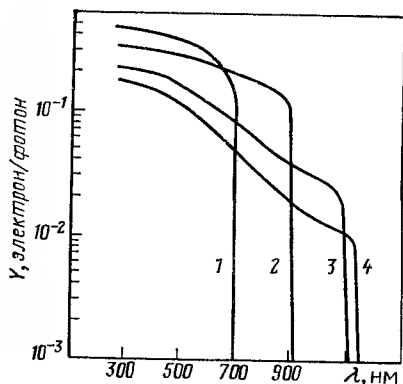


Рис. 25.22. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов с ОЭС: 1 — GaAsP; 2 — GaAs; 3, 4 — InGaAsP с разной шириной запрещенной зоны [18]

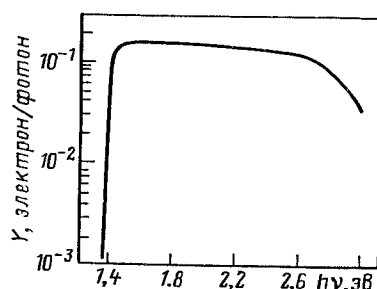


Рис. 25.23. Спектральная характеристика квантового выхода ФЭ для полупрозрачного фотокатода из GaAs [18]

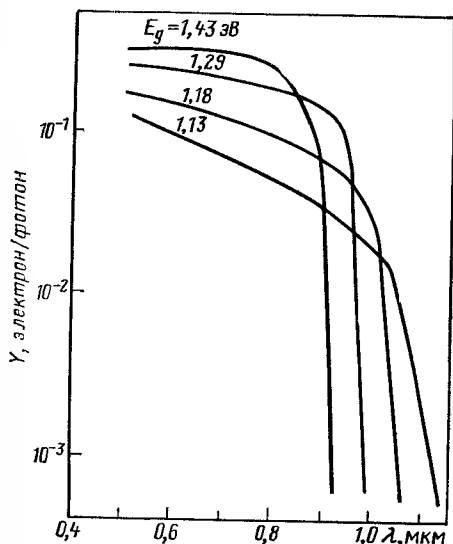


Рис. 25.24. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов из  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  с различной шириной запрещенной зоны:  $E_g = 1,43$  эВ  $x=0$ ;  $E_g = 1,29$  эВ  $x=0,1$ ;  $E_g = 1,18$  эВ  $x=0,17$ ;  $E_g = 1,13$  эВ  $x=0,2$  [20]

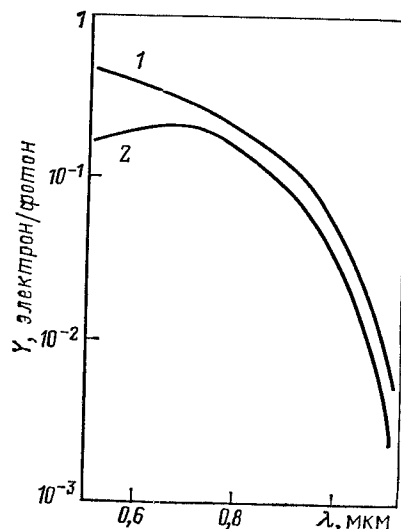


Рис. 25.25. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для кремниевого фотокатода при освещении «на отражение» (1) и «на просвет» (2) [21]

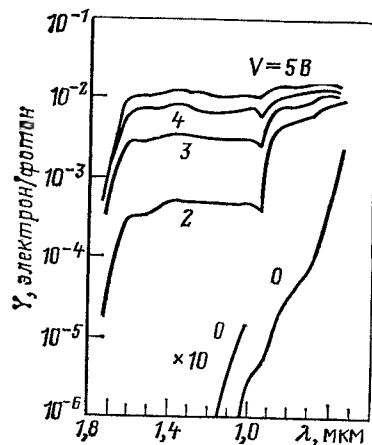


Рис. 25.26. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов из InGaAs — InP — Ag — Cs — O, при различных значениях внешнего смещения [19]

**Рентгеновая фотоэлектронная эмиссия (РФЭ)** возникает под действием рентгеновского излучения и связана с переходом фотоэлектронов с глубоких атомных уровней в вакуум. Характерной особенностью фотоэлектронных спектров РФЭ является наличие узких линий, соответствующих фотоэлектронам, которые вышли из тела без рассеяния энергии (табл. 25.18 и рис. 25.28—25.30). При использовании длинноволнового рентгеновского излучения ( $h\nu = 1$  кэВ) энергия эмитированных электронов составляет несколько сот электрон-вольт. Длина свободного пробега таких электронов равна 0,5—2 нм (рис. 25.27), так что линейчатая часть спектров РФЭ отражает свойства приповерхностного слоя толщиной до пяти монослоев. Эта особенность спектров РФЭ позволяет использовать их для анализа состава поверхности в рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Энергии для химических элементов в соединениях различаются на несколько электрон-вольт. Так, для углерода энергия фотоэлектронной 1 s-линии меняется от 281 (NiC, TiC) до 292 эВ ( $\text{CO}_2$ ). Этот эффект, обычно называемый химическим сдвигом, дает возможность получать с помощью РФЭС информацию не только о составе поверхности, но и о химических

Таблица 25.18. Энергия основных фотоэлектронных рентгеновских линий (энергия связи) химических элементов ( $h\nu = 1486,6$  эВ) и относительное сечение фотоионизации для этих линий. Сечение фотоионизации 1 s-линии натрия принято за единицу [37, 39]

| Элемент | Средняя энергия линии, эВ | Диапазон энергии линии, эВ | Относительное сечение фотоионизации |
|---------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
|---------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|

*1s-переход*

|                  |      |    |       |
|------------------|------|----|-------|
| <sup>3</sup> Li  | 56   | —  | 0,009 |
| <sup>4</sup> Be  | 113  | 4  | 0,033 |
| <sup>5</sup> B   | 191  | 8  | —     |
| <sup>6</sup> C   | 287  | 12 | 0,127 |
| <sup>7</sup> N   | 402  | 9  | 0,188 |
| <sup>8</sup> O   | 531  | 4  | 0,338 |
| <sup>9</sup> F   | 686  | 6  | 0,480 |
| <sup>10</sup> Ne | 863  | 0  | —     |
| <sup>11</sup> Na | 1072 | 2  | 1,000 |
| <sup>12</sup> Mg | 1305 | 2  | —     |

*2p<sub>1/2</sub>-переход*

|                  |    |   |       |
|------------------|----|---|-------|
| <sup>13</sup> Al | 74 | 4 | 0,086 |
|------------------|----|---|-------|

*2p<sub>3/2</sub>-переход*

|                  |      |    |       |
|------------------|------|----|-------|
| <sup>14</sup> Si | 102  | 6  | —     |
| <sup>15</sup> P  | 133  | 8  | 0,141 |
| <sup>16</sup> S  | 165  | 8  | 0,163 |
| <sup>17</sup> Cl | 199  | 11 | 0,198 |
| <sup>18</sup> Ar | 241  | 0  | —     |
| <sup>19</sup> K  | 293  | 1  | 0,424 |
| <sup>20</sup> Ca | 347  | 2  | 0,377 |
| <sup>21</sup> Sc | 402  | 6  | —     |
| <sup>22</sup> Ti | 458  | 8  | —     |
| <sup>23</sup> V  | 515  | 6  | 0,421 |
| <sup>24</sup> Cr | 577  | 6  | 0,522 |
| <sup>25</sup> Mn | 641  | 4  | 0,478 |
| <sup>26</sup> Fe | 710  | 8  | 0,865 |
| <sup>27</sup> Co | 781  | 6  | 0,777 |
| <sup>28</sup> Ni | 855  | 6  | 0,836 |
| <sup>29</sup> Cu | 934  | 4  | 1,500 |
| <sup>30</sup> Zn | 1022 | 2  | 0,135 |
| <sup>31</sup> Ga | 1117 | 2  | 0,200 |
| <sup>32</sup> Ge | 1219 | 4  | 0,210 |
| <sup>33</sup> As | 1329 | 7  | 0,180 |

*3d<sub>5/2</sub>-переход*

|                  |     |   |       |
|------------------|-----|---|-------|
| <sup>34</sup> Se | 57  | 8 | 0,239 |
| <sup>35</sup> Br | 69  | 7 | 0,262 |
| <sup>36</sup> Kr | 88  | 0 | —     |
| <sup>37</sup> Rb | 110 | 1 | 0,284 |
| <sup>38</sup> Sr | 133 | — | 0,380 |
| <sup>39</sup> Y  | 158 | — | 0,430 |

Продолжение табл. 25.18

| Элемент          | Средняя энергия линии, эВ | Диапазон энергии линии, эВ | Относительное сечение фотоионизации |
|------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| <sup>40</sup> Zr | 181                       | 6                          | 0,570                               |
| <sup>41</sup> Nb | 206                       | 8                          | 0,564                               |
| <sup>42</sup> Mo | 230                       | 6                          | —                                   |
| <sup>43</sup> Tc | 253                       | —                          | —                                   |
| <sup>44</sup> Ru | 282                       | 4                          | 0,846                               |
| <sup>45</sup> Rh | 309                       | 4                          | 0,990                               |
| <sup>46</sup> Pd | 337                       | 5                          | 0,894                               |
| <sup>47</sup> Ag | 368                       | 2                          | 1,170                               |
| <sup>48</sup> Cd | 405                       | 2                          | 1,410                               |
| <sup>49</sup> In | 445                       | 3                          | 1,880                               |
| <sup>50</sup> Sn | 486                       | 3                          | 2,35                                |
| <sup>51</sup> Sb | 530                       | 4                          | 2,81                                |
| <sup>52</sup> Tb | 575                       | 5                          | 1,89                                |
| <sup>53</sup> I  | 619                       | 6                          | 1,88                                |
| <sup>54</sup> Xe | 672                       | 4                          | —                                   |
| <sup>55</sup> Cs | 724                       | 2                          | 3,12                                |
| <sup>56</sup> Ba | 780                       | 2                          | 2,70                                |
| <sup>57</sup> La | 834                       | —                          | 1,00                                |
| <sup>58</sup> Ce | 882                       | —                          | 1,00                                |
| <sup>59</sup> Pr | 930                       | —                          | 1,00                                |
| <sup>60</sup> Nd | 980                       | —                          | 1,51                                |
| <sup>61</sup> Pm | 1034                      | —                          | —                                   |
| <sup>62</sup> Sm | 1083                      | —                          | 1,21                                |
| <sup>63</sup> Eu | 1136                      | —                          | 1,24                                |
| <sup>64</sup> Gd | 1186                      | —                          | 1,91                                |
| <sup>65</sup> Tb | 1244                      | —                          | —                                   |
| <sup>66</sup> Dy | 1295                      | —                          | —                                   |

*4d<sub>5/2</sub>-переход*

|                  |     |   |       |
|------------------|-----|---|-------|
| <sup>67</sup> Ho | 161 | — | 0,119 |
| <sup>68</sup> Er | 169 | — | 0,237 |
| <sup>69</sup> Tm | 180 | — | 0,189 |
| <sup>70</sup> Yb | 185 | — | 0,282 |
| <sup>71</sup> Lu | 197 | — | 0,236 |

*4f<sub>7/2</sub>-переход*

|                  |     |   |       |
|------------------|-----|---|-------|
| <sup>72</sup> Hf | 17  | 6 | 0,427 |
| <sup>73</sup> Ta | 25  | 8 | 0,660 |
| <sup>74</sup> W  | 34  | 6 | —     |
| <sup>75</sup> Re | 43  | 6 | 0,885 |
| <sup>76</sup> Os | 52  | 3 | 0,625 |
| <sup>77</sup> Ir | 62  | 4 | 0,860 |
| <sup>78</sup> Pt | 73  | 5 | 0,86  |
| <sup>79</sup> Au | 85  | 3 | 1,04  |
| <sup>80</sup> Hg | 100 | 2 | 1,14  |
| <sup>81</sup> Tl | 118 | 2 | 1,17  |
| <sup>82</sup> Pb | 138 | 3 | 1,507 |
| <sup>83</sup> Bi | 159 | 4 | 1,67  |
| <sup>90</sup> Th | 335 | 3 | 3,30  |
| <sup>92</sup> V  | 380 | 5 | 3,34  |

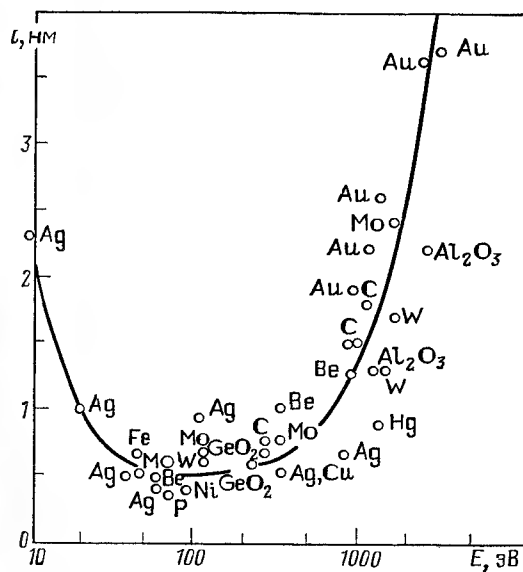


Рис. 25.27. Зависимость средней глубины выхода  $l$  электронов из твердых тел от энергии электронов [23]



Рис. 25.28. Фотоэлектронный рентгеновский спектр углерода (мишень — полиэтилен) [39]: по оси абсцисс отложена энергия связи электрона в атоме

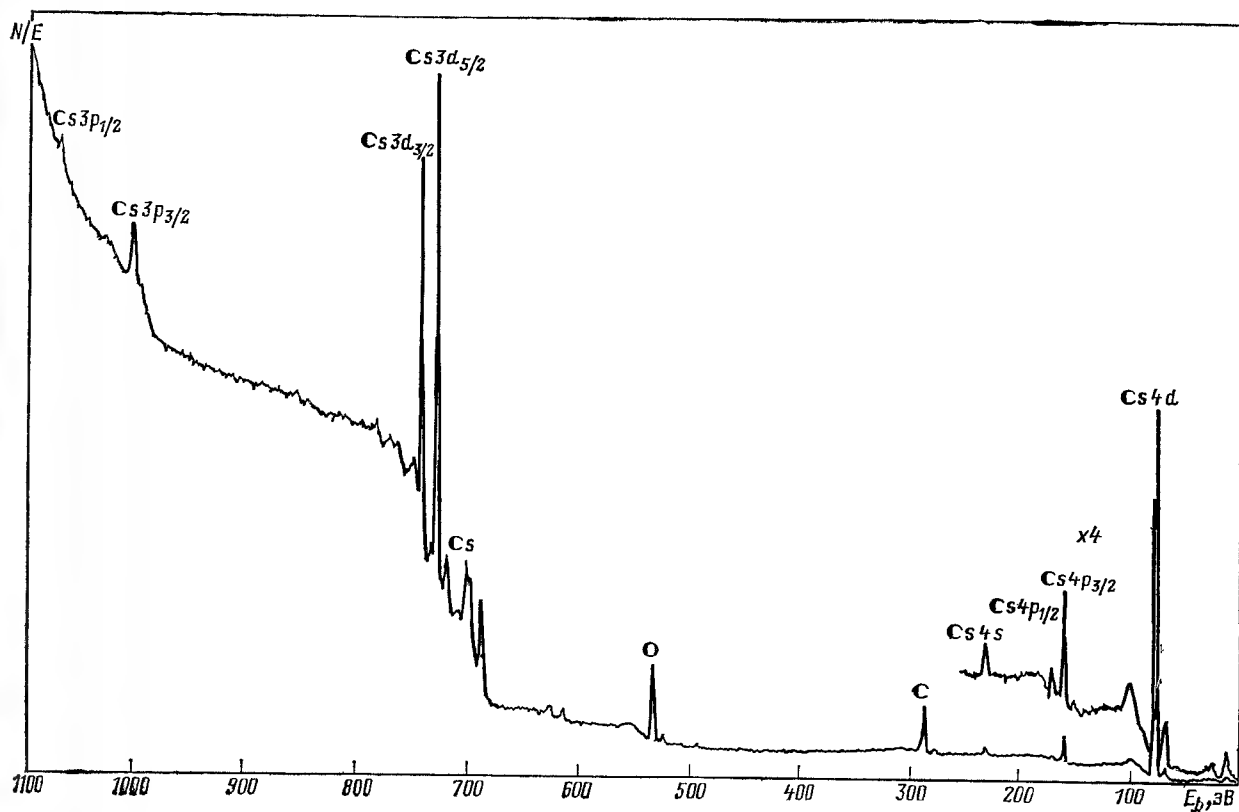


Рис. 25.29. Фотоэлектронный рентгеновский спектр цезия (мишень —  $\text{CsOH}$ ) [39]: по оси абсцисс отложена энергия связи электрона в атоме

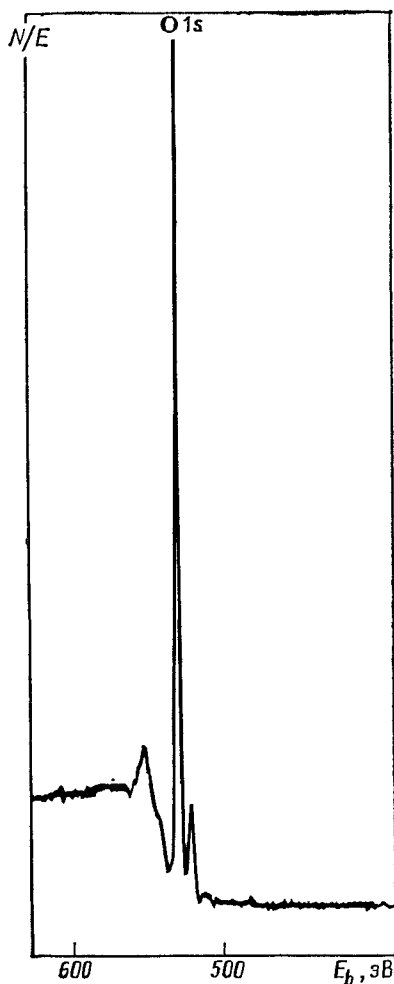


Рис. 25.30. Фотоэлектронный рентгеновский спектр кислорода (мишень —  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [39]: по оси абсцисс отложена энергия связи

## 25.5. ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

**Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ)** — эмиссия электронов, вызываемая бомбардировкой тел электронами.

**Основные закономерности ВЭЭ.** Электроны, бомбардирующие поверхность тела, называются первичными; электроны, эмитированные телом, — вторичными. Вторичные электроны могут эмитироваться как со стороны облучаемой первичным пучком поверхности тела (ВЭЭ «на отражение»), так и — в тонкопленочных эмиттерах — со стороны поверхности, противоположной облучаемой (ВЭЭ «на прострел»). Основной характеристикой вторично-электронных эмиттеров является зависимость  $\sigma$  — коэффициента ВЭЭ от энергии  $E_p$  первичных электронов. Коэффициент ВЭЭ есть отношение числа электронов  $N_2$ , испускаемых телом, к числу падающих на него за то же время первичных электронов  $N_1$ :  $\sigma = N_2/N_1 =$

$= I_2/I_1$  ( $I_1, I_2$  — первичный и вторичный токи соответственно). Значение  $\sigma$  зависит от свойств и структуры эмиттера, состояния его поверхности, энергии первичных электронов  $E_p$  и угла падения первичного пучка на поверхность эмиттера.

В потоке вторичных электронов имеются две группы электронов: истинно вторичные — электроны вещества, которые получили от первичного пучка энергию, достаточную для их выхода в вакуум, и отраженные (упруго и неупруго) — часть первичного пучка, отраженная от тела. При малых  $E_p$  ( $E_p < 10$  эВ) основную долю вторичных электронов составляют упруго отраженные электроны. С ростом  $E_p$  доля упруго отраженных электронов уменьшается и при  $E_p > 0,1$  кэВ дает лишь несколько процентов всей ВЭЭ. Истинно вторичные электроны имеют энергию от 0 примерно до 50 эВ. Наиболее вероятная энергия истинно вторичных электронов составляет 1,5—3,5 эВ. Неупруго отраженными условно принято считать вторичные электроны, энергия которых превышает 50 эВ. Отношение числа неупруго отраженных электронов к числу первичных электронов называется коэффициентом неупругого отражения  $\eta = N_2$  ( $E_p > 50$  эВ)/ $N_1$  (в  $N_2$  входят и упруго отраженные электроны, но число их мало и на значение  $\eta$  не сказывается).

**ВЭЭ из металлов и полупроводников.** В металлах и полупроводниках максимальное значение  $\sigma_m$  обычно лежит в пределах 0,5—1,8 (табл. 25.19—25.21 и рис. 25.31—25.38). В некоторых диэлектриках (щелочно-галогенидные кристаллы,  $\text{MgO}$ )  $\sigma_m$  значительно больше (10—35). Это обусловлено большой глубиной выхода вторичных электронов из этих материалов (20—100 нм). Наличие в диэлектрике сильного электрического поля, направленного от эмитирующей поверхности в глубь слоя (т. е. ускоряющего вторичные электроны), приводит к значительному увеличению  $\sigma$ . Сильное поле обычно создается электронной бомбардировкой тонкого слоя диэлектрика на проводящей подложке при такой энергии  $E_p$ , что  $\sigma > 1$ . В результате поверхность диэлектрика заряжается положительно относительно металлической подложки. Ток ВЭЭ, возникающий в присутствии сильного электрического поля в эмиттере, состоит из двух компонент: малонерационной (эта часть называется вторичной электронной эмиссией, усиленной полем, ее иерационность менее  $10^{-6}$  с) и самоподдерживающейся, существующей и при отсутствии первичного пучка, после того как осуществлена первоначальная зарядка слоя.

**Эффективные эмиттеры вторичных электронов.** Эффективные эмиттеры фотоэлектронов: сурьмяно-цезиевый, многощелочной, фотоэмиттеры с ОЭС и другие — одновременно являются эффективными эмиттерами вторичных электронов. Широкое распространение получили также эффективные эмиттеры вторичных электронов на основе сплавов магния, бериллия и некоторых других элементов. Эти эмиттеры представляют собой слой оксида соответствующего металла на поверхности исходного сплава ( $\text{Ag—Mg}$ ,  $\text{Al—Mg}$ ,  $\text{Cu—Be}$ ,  $\text{Ni—Be}$  и т. п.). В канальных вторичных электронных умножителях используются эмиттеры вторичных электронов из проводящих стекол.

Характеристики эффективных эмиттеров вторичных электронов приведены в табл. 25.22—25.24 и на рис. 25.39—25.43, где  $E_{p\text{ м}}$  — энергия первичных электронов, при которой достигается максимальное значение коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\sigma_m$ .

Таблица 25.19. Коэффициенты ВЭЭ  
для различных поликристаллов [22]

| Элемент  | $\sigma_m$ | $E_{pm}$ , эВ | Элемент             | $\sigma_m$ | $E_{pm}$ , эВ |
|----------|------------|---------------|---------------------|------------|---------------|
| Алюминий | 0,88       | 300           | Никель              | 1,34       | 600           |
| Барий    | 0,83       | 400           | Ниобий              | 1,2        | 370           |
| Бериллий | 0,55       | 200           | Олово               | 1,43       | 600           |
| Бор      | 1,2        | 150           | Осмий               | 1,7        | 750           |
| Висмут   | 1,32       | 900           | Палладий            | 1,75       | 550           |
| Вольфрам | 1,4        | 700           | Платина             | 1,8        | 850           |
| Галлий   | 1,08       | 500           | Рений               | 1,6        | 750           |
| Гафний   | 1,16       | 700           | Ртуть               | 1,63       | 700           |
| Германий | 1,08       | 400           | Селен               | 1,23       | 300           |
| Железо   | 1,3        | 350           | Серебро             | 1,70       | 800           |
| Золото   | 1,81       | 900           | Скандий             | 0,83       | 200—250       |
| Индий    | 1,41       | 500           | Свинец              | 1,4        | 700           |
| Иридий   | 1,8        | 800           | Стронций            | 0,72       | 400           |
| Иттрий   | 0,93       | 350           | Сурьма              | 1,19       | 600           |
| Кадмий   | 1,59       | 800           | Таллий              | 1,30       | 700           |
| Калий    | 0,53       | 170           | Теллур              | 1,22       | 450           |
| Кальций  | 0,60       | 200           | Титан               | 0,83       | 300           |
| Кремний  | 1,03       | 300           | Торий               | 1,14       | 600—1000      |
| Лантан   | 1,03       | 500           | Углерод<br>(графит) | 1,0        | 300           |
| Литий    | 0,48       | 75            | Цезий               | 0,72       | 400           |
| Магний   | 0,88       | 300           | Цинк                | 1,41       | 700           |
| Медь     | 1,40       | 700           | Цирконий            | 1,1        | 350           |
| Молибден | 1,23       | 600           |                     |            |               |

Таблица 25.20. Коэффициенты ВЭЭ  
для некоторых оксидов и халькогенидов [22]

| Соединение       | $\sigma_m$ | $E_{pm}$ , эВ |
|------------------|------------|---------------|
| Оксид:           |            |               |
| бора             | 2,5—2,8    | 250           |
| сурьмы           | 1,6—1,8    | —             |
| теллура          | 1,7—1,85   | 600           |
| свинца           | 1,8—2,0    | 600           |
| Селенид:         |            |               |
| висмута          | 1,25—1,35  | 600—700       |
| индия            | 1,3—1,5    | 300—350       |
| кальция          | 1,4—1,6    | 300—350       |
| мышьяка          | 1,1—1,4    | 400           |
| сурьмы           | 1,2—1,4    | 500—600       |
| Сернистая сурьма | 1,1—1,35   | 450—500       |
| Сернистый:       |            |               |
| мышьяк           | 1,5—1,8    | 300           |
| свинец           | 1,25—1,3   | 500           |
| германий         | 1—1,05     | 400           |
| Теллурид:        |            |               |
| мышьяка          | 1,1—1,3    | 400           |
| сурьмы           | 1,2—1,35   | 700—800       |

Таблица 25.21. Анизотропия вторично-эмиссионных свойств монокристаллов [4]

| Металл   | Параметр ВЭЭ  | Плоскости монокристаллов |          |           |       |         |       | Поликристаллы |
|----------|---------------|--------------------------|----------|-----------|-------|---------|-------|---------------|
|          |               | (100)                    | (111)    | (110)     | (116) | (112)   | (102) |               |
| Вольфрам | $\sigma_m$    | 1,66                     | 1,58     | 1,48      | 1,39  | —       | —     | 1,42          |
|          | $E_{pm}$ , эВ | 780                      | 670      | 550—720   | 820   | —       | —     | 700           |
| Железо   | $\sigma_m$    | —                        | —        | 1,34      | —     | —       | —     | 1,30          |
|          | $E_{pm}$ , эВ | —                        | —        | 450       | —     | —       | —     | 350           |
| Иридий   | $\sigma_m$    | 2,11                     | 1,85     | 1,95      | —     | —       | —     | 1,80          |
|          | $E_{pm}$ , эВ | 650                      | 650      | 650       | —     | —       | —     | 800           |
| Молибден | $\sigma_m$    | 1,52—1,58                | 1,4—1,45 | 1,35      | —     | 1,14    | 125   | 1,28          |
|          | $E_{pm}$ , эВ | 350—400                  | 350—510  | 400—460   | —     | 720—760 | 550   | 400           |
| Никель   | $\sigma_m$    | —                        | 1,52     | —         | —     | —       | —     | 1,34          |
|          | $E_{pm}$ , эВ | —                        | 770      | —         | —     | —       | —     | 600           |
| Ниобий   | $\sigma_m$    | 1,38                     | 1,29     | 1,25—1,34 | —     | —       | —     | 1,20          |
|          | $E_{pm}$ , эВ | 350—820                  | 360      | 380—880   | —     | —       | —     | 370           |
| Тантал   | $\sigma_m$    | 1,43                     | —        | —         | —     | 1,25    | —     | 1,3           |
|          | $E_{pm}$ , эВ | 750                      | —        | —         | —     | 740     | —     | 700           |

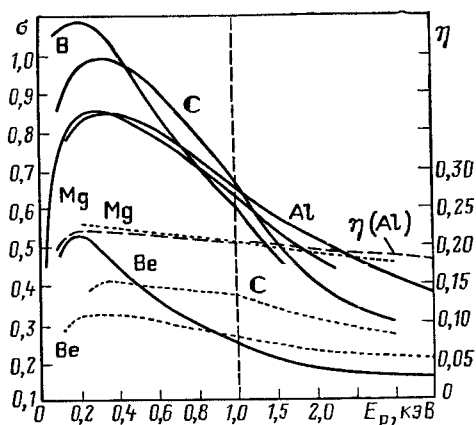


Рис. 25.31. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\sigma$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для бора, углерода, бериллия, магния и алюминия [22]

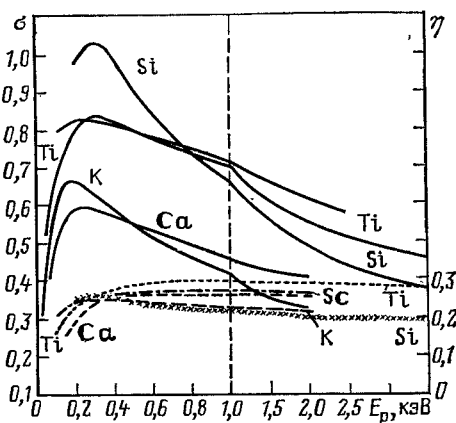


Рис. 25.32. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\sigma$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для калия, кальция, скандия, титана и кремния [22]

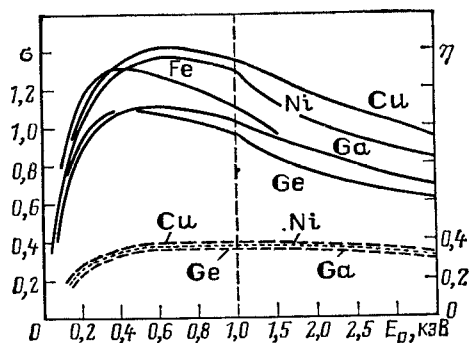


Рис. 25.33. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\sigma$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для железа, никеля, меди, галлия и германия [22]

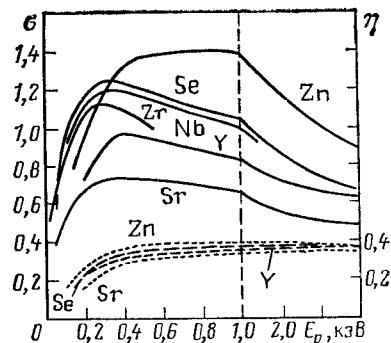


Рис. 25.34. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\delta$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для цинка, селена, стронция, иттрия, циркония и ниобия [22]

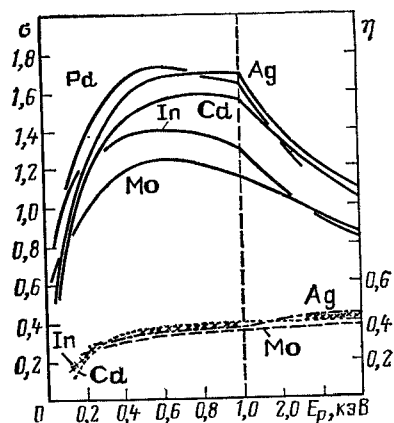


Рис. 25.35. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\sigma$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для молибдена, палладия, серебра, кадмия и индия [22]

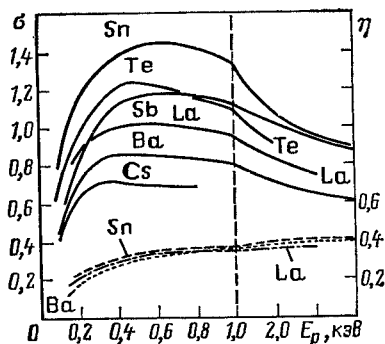


Рис. 25.36. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\sigma$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для олова, сурьмы, теллура, цезия, бария и лантана [22]

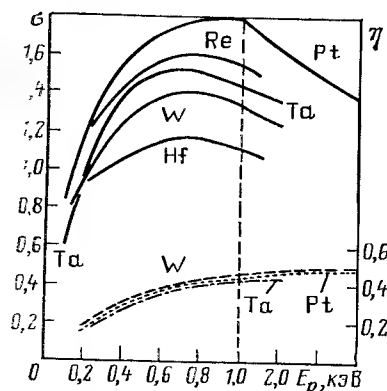


Рис. 25.37. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\sigma$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для гафния, тантала, вольфрама, рения и платины [22]

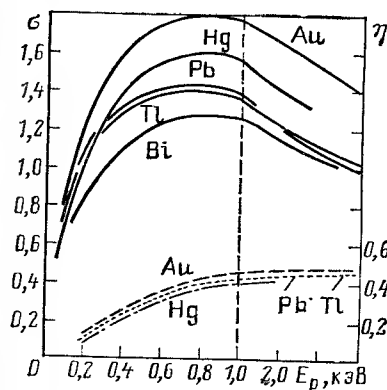


Рис. 25.38. Зависимость коэффициента ВЭЭ  $\sigma$  (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  от энергии первичных электронов для золота, ртути, таллия, свинца и висмута [22]

Таблица 25.22. Максимальные значения коэффициента ВЭЭ для эффективных эмиттеров [13]

| Эмиттер                                          | $\sigma_m$ | $E_{pm}$ , кэВ |
|--------------------------------------------------|------------|----------------|
| CsNa <sub>2</sub> KSb                            | 39         | 1,8            |
| Cs <sub>3</sub> Sb                               | 10         | 0,5            |
| Cu—Be                                            | 6—8        | 0,6            |
| Ag—Mg                                            | 12         | 0,6            |
| GaP (100) (монокристалл) — CsO                   | 500        | 12             |
| GaP (поликристалл) — CsO                         | 200        | 4              |
| GaAs (100) — CsO                                 | 540        | 20             |
| Si (100) — CsO                                   | 950        | 20             |
| GaAs <sub>0,5</sub> P <sub>0,5</sub> (100) — CsO | 110        | 1,7            |
| CsCl                                             | 20         | 2              |
| CsI                                              | 20—35      | 1,7—5,5        |
| CaF <sub>2</sub>                                 | 5          | 1,4            |
| MgO                                              | 20         | 0,9            |

Таблица 25.23. Коэффициенты ВЭЭ эффективных эмиттеров «на прострел» [24]

| Эмиттер  | $\sigma$ при $E_p$ , кэВ |     |     |     |     |
|----------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
|          | 2                        | 5   | 10  | 15  | 20  |
| KCl      | 0,5                      | 4,2 | 2   | 2   | 2   |
| MgO      | 2                        | 5   | 4   | —   | —   |
| Si—CsO   | 0                        | 50  | 200 | 520 | 725 |
| GaAs—CsO | 0                        | 2   | 15  | 60  | 112 |

Таблица 25.24. Коэффициенты ВЭЭ для эффективных эмиттеров при малых энергиях первичных электронов  $E_p$  [24]

| Эмиттер                   | $\sigma$ при $E_p$ , эВ |      |       |
|---------------------------|-------------------------|------|-------|
|                           | 300                     | 600  | 1000  |
| CuBe                      | 2—4                     | 4—6  | 7—12  |
| CuAlMg                    | 2—4                     | 3—7  | 7—16  |
| Cs <sub>3</sub> Sb        | 2—6                     | 4—15 | 3—12  |
| CsNa <sub>2</sub> KSb     | 3—5                     | 7—11 | 10—19 |
| GaP (поликристалл) — CsO  | 28                      | 50   | 68    |
| GaAs (поликристалл) — CsO | 26                      | 42   | 65    |

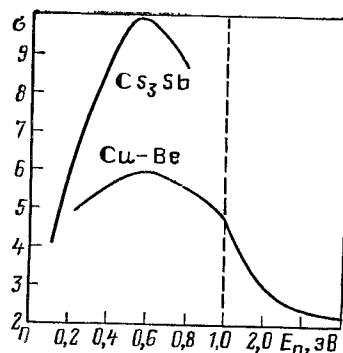


Рис. 25.39. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для Cs<sub>3</sub>Sb и медно-бериллиевого сплава [15]

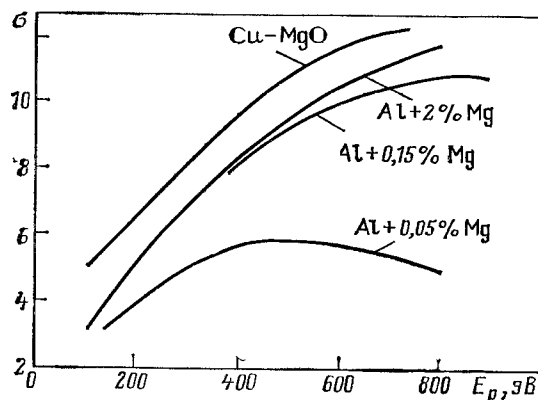


Рис. 25.40. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для алюминий-магниевого и медно-магниевого сплавов [15]



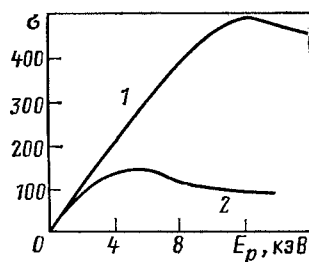


Рис. 25.41. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для моно- (1) и поликристаллического (2) GaP—CsO-эмиттеров

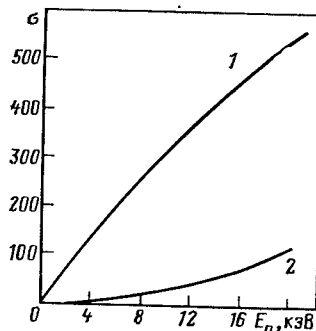


Рис. 25.42. Зависимость коэффициента ВЭЭ для GaAs—CsO-эмиттеров от энергии первичных электронов «на отражение» (1) и «на прострел» ( $d=3\div4$  мкм) (2) [26]

Таблица 25.25. Энергия основных пиков оже-электронов  $E_{0,э}$  для различных элементов и относительная оже-чувствительность  $\xi$  [38]

| Элемент            | $E_{0,э}$ , эВ | $\xi^*$ при $E_p = 3$ кэВ |
|--------------------|----------------|---------------------------|
| <i>KLL-переход</i> |                |                           |
| $^3\text{Li}$      | 43             | —                         |
| $^4\text{Be}$      | 104            | 0,14                      |
| $^5\text{B}$       | 179            | 0,15                      |
| $^6\text{C}$       | 272            | 0,2                       |
| $^7\text{N}$       | 379            | 0,3                       |
| $^8\text{O}$       | 503            | 0,5                       |
| $^9\text{F}$       | 647            | 0,48                      |
| $^{11}\text{Na}$   | 990            | 0,22                      |
| $^{12}\text{Mg}$   | 1180           | 0,11                      |
| $^{13}\text{Al}$   | 1396           | 0,05                      |
| <i>LMM-переход</i> |                |                           |
| $^{13}\text{Al}$   | 68             | 0,24                      |
| $^{14}\text{Si}$   | 92             | 0,35                      |
| $^{15}\text{P}$    | 120            | 0,55                      |
| $^{16}\text{S}$    | 152            | 0,8                       |
| $^{17}\text{Cl}$   | 181            | 1                         |
| $^{18}\text{Ar}$   | 215            | —                         |
| $^{19}\text{K}$    | 252            | 0,8                       |
| $^{20}\text{Ca}$   | 291            | 0,5                       |
| $^{21}\text{Sc}$   | 340            | 0,35                      |
| $^{22}\text{Ti}$   | 418            | 0,45                      |
| $^{23}\text{V}$    | 473            | 0,45                      |
| $^{24}\text{Cr}$   | 529            | 0,32                      |
| $^{25}\text{Mn}$   | 589            | 0,23                      |
| $^{26}\text{Fe}$   | 703            | 0,21                      |
| $^{27}\text{Co}$   | 775            | 0,27                      |
| $^{28}\text{Ni}$   | 848            | 0,26                      |
| $^{29}\text{Cu}$   | 920            | 0,22                      |
| $^{30}\text{Zn}$   | 994            | 0,17                      |
| $^{31}\text{Ga}$   | 1070           | 0,13                      |
| $^{32}\text{Ge}$   | 1147           | 0,1                       |
| $^{33}\text{As}$   | 1228           | 0,08                      |
| $^{34}\text{Se}$   | 1315           | 0,065                     |
| $^{35}\text{Br}$   | 1396           | 0,05                      |
| $^{37}\text{Rb}$   | 1565           | 0,03                      |
| $^{38}\text{Sr}$   | 1649           | 0,025                     |
| $^{39}\text{Y}$    | 1746           | 0,02                      |

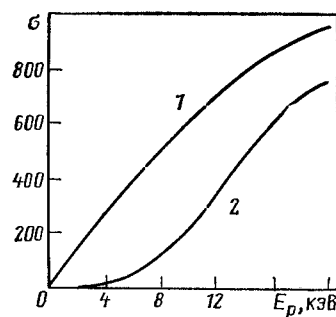


Рис. 25.43. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для Si—CsO-эмиттеров «на отражение» (1) и «на прострел» ( $d=4\div5$  мкм) (2) [25]

**Эмиссия оже-электронов (ЭОЭ).** В спектрах вторичных электронов имеются узкие линии, соответствующие вторичным электронам, возникшим в результате оже-процесса, протекающего при бомбардировке тела первичными электронами, которые вышли из тела без рассеяния (табл. 25.25 и рис. 25.44—25.46). Этот процесс состоит в следующем. При возбуждении атома первичными электронами происходит переход электрона с какого-либо внутреннего уровня (например, K) в свободное состояние выше уровня вакуума. Освободившийся

Продолжение табл. 25.25

| Элемент            | $E_{0,э}$ , эВ | $\xi^*$ при $E_p = 3$ кэВ |
|--------------------|----------------|---------------------------|
| <i>MNN-переход</i> |                |                           |
| $^{40}\text{Zr}$   | 147            | 0,22                      |
| $^{41}\text{Nb}$   | 167            | 0,26                      |
| $^{42}\text{Mo}$   | 186            | 0,33                      |
| $^{44}\text{Ru}$   | 273            | 0,5                       |
| $^{45}\text{Rh}$   | 302            | 0,65                      |
| $^{46}\text{Pd}$   | 330            | 0,8                       |
| $^{47}\text{Ag}$   | 351            | 1                         |
| $^{48}\text{Cd}$   | 376            | 1                         |
| $^{49}\text{In}$   | 404            | 0,95                      |
| $^{50}\text{Sn}$   | 430            | 0,8                       |
| $^{51}\text{Sb}$   | 454            | 0,6                       |
| $^{52}\text{Te}$   | 483            | 0,45                      |
| $^{53}\text{I}$    | 511            | 0,32                      |
| $^{54}\text{Xe}$   | 532            | —                         |
| $^{55}\text{Cs}$   | 563            | 0,16                      |
| $^{56}\text{Ba}$   | 584            | 0,12                      |
| $^{57}\text{La}$   | 625            | 0,09                      |
| $^{58}\text{Ce}$   | 661            | 0,065                     |
| $^{59}\text{Pr}$   | 669            | 0,05                      |
| $^{60}\text{Nd}$   | 730            | 0,04                      |
| $^{62}\text{Sm}$   | 814            | 0,028                     |
| $^{63}\text{Eu}$   | 858            | 0,026                     |
| $^{64}\text{Gd}$   | 895            | 0,024                     |
| $^{65}\text{Tb}$   | 1073           | 0,024                     |
| $^{66}\text{Dy}$   | 1126           | 0,024                     |
| $^{67}\text{Ho}$   | 1175           | 0,024                     |
| $^{68}\text{Er}$   | 1393           | 0,025                     |
| $^{69}\text{Tm}$   | 1449           | 0,027                     |
| $^{70}\text{Yb}$   | 1514           | 0,03                      |
| $^{71}\text{Lu}$   | 1573           | 0,036                     |
| $^{72}\text{Hf}$   | 1624           | 0,045                     |
| $^{73}\text{Ta}$   | 1680           | 0,055                     |
| $^{74}\text{W}$    | 1736           | 0,05                      |
| $^{75}\text{Re}$   | 1799           | 0,04                      |
| $^{77}\text{Ir}$   | 1908           | 0,027                     |
| $^{78}\text{Pt}$   | 1967           | 0,022                     |
| $^{79}\text{Au}$   | 2024           | 0,019                     |
| $^{80}\text{Hg}$   | 2078           | —                         |

\* Относительная оже-чувствительность серебра ( $E = 351$  эВ) принята равной единице.

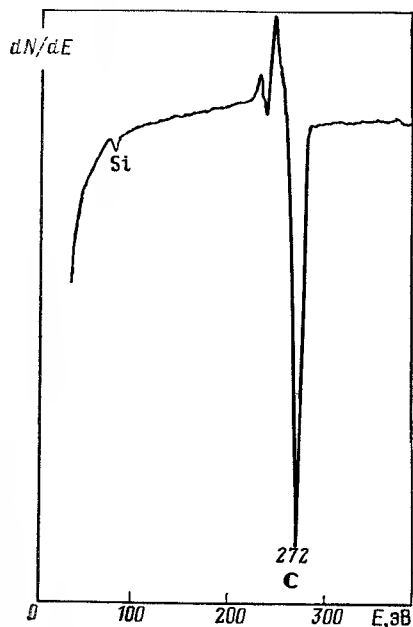


Рис. 25.44. Оже-спектр углерода [42]

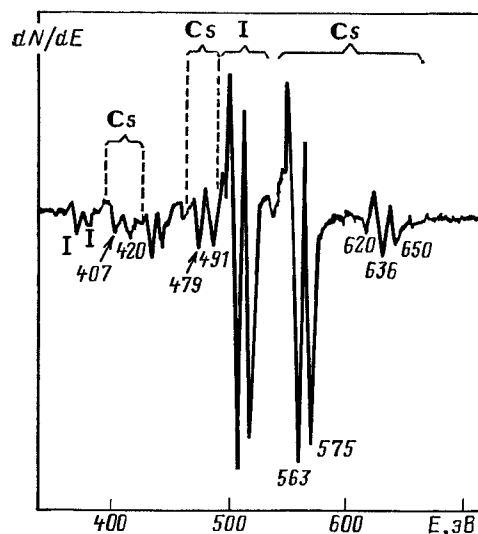


Рис. 25.46. Оже-спектр цезия (мишень CsI) [42]

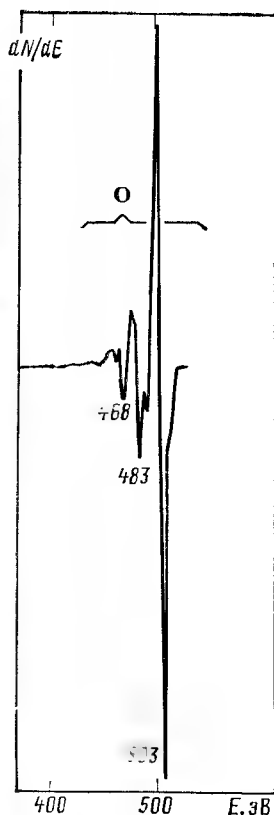


Рис. 25.45. Оже-спектр кислорода (мишень MgO) [42]

уровень заполняется электроном с вышележащего уровня (например,  $L$ ). Выделившаяся при этом энергия, которая приблизительно равна  $E_K - E_L$  (где  $E_K$  и  $E_L$  — энергия связи электронов на уровнях  $K$  и  $L$  соответственно), испускается в виде рентгеновского кванта либо передается другому электрону, находящемуся на соседнем уровне. Такой процесс приводит к эмиссии из атома электрона с энергией  $E_{KLL}$ , приблизительно равной  $E_K - 2E_L$ . Кроме серии  $KLL$  интенсивны также оже-серии  $LMM$ ,  $MNN$  и др.

Энергия оже-пика характеризует данный атом, поэтому анализ спектров оже-электронов позволяет получить информацию о составе приповерхностной области твердого тела, откуда происходит ЭОЭ. Энергия оже-электронов лежит в диапазоне 30—2000 эВ. Средняя длина свободного пробега электронов с такими же энергиями составляет 0,5—2 нм, так что спектры оже-электронов отражают свойства приповерхностного слоя толщиной до пяти монослоев. Амплитуда оже-пика пропорциональна концентрации атомов данного сорта на поверхности твердого тела и эффективности оже-переходов, которая характеризуется величиной, называемой оже-чувствительностью. Она определяется числом вторичных оже-электронов с данной энергией, испущенных данным элементом, в расчете на число первичных электронов и зависит от энергии первичных электронов. Анализ спектров оже-электронов лежит в основе электронной оже-спектроскопии (ЭОС) — основного метода изучения состава поверхности твердых тел.

## 25.6. ПОЛЕВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Полевая (туннельная, автоэлектронная) эмиссия (ПЭ) — испускание телами электронов под действием сильного внешнего электрического поля у их поверхности. Если внешнее электрическое поле достаточно велико для того, чтобы потенциальный барьер на границе тела превратился в барьер конечной и малой ширины ( $\mathcal{E} \geq 10^7$  В/см), то становится возможным просачивание электронов сквозь барьер (квантовомеханическое туннелирование) и выход их в вакуум. При этом электроны непосредственно после прохождения сквозь барьер имеют ту же энергию, что и внутри тела, а электрическое поле совершает работу только на ускорение электронов в вакууме в межэлектродном промежутке между эмиттером

и анодом и на нагревание эмиттера проходящим по нему эмиссионным током. Плотность тока ПЭ,  $A/cm^2$ , из металла при  $T \leq 20^\circ C$  описывается формулой [27] ( $\mathcal{E}$  — в В/см):

$$j = \frac{e^2 \mathcal{E}^2}{8\pi h \varphi} \exp \left[ -\frac{8\pi}{3} \frac{(2m)^{1/2}}{h} \frac{(e\varphi)^{3/2}}{e\mathcal{E}} \theta(y) \right],$$

где  $\theta(y)$  — функция Нордгейма (табл. 25.26), в которой аргументом является относительное снижение работы выхода внешним электрическим полем напряженностью  $E$  в соответствии с эффектом Шоттки:

$$y = \Delta(e\varphi)/e\varphi = (e\mathcal{E})^{1/2} / \varphi.$$

Если  $e\varphi$  — в эВ, а  $\mathcal{E}$  — в В/см, то плотность тока ПЭ (в  $A/cm^2$ )

$$j = 1,54 \cdot 10^{-6} \frac{\mathcal{E}^2}{e\varphi} \exp \left[ -\frac{6,79 \cdot 10^7 (e\varphi)^{3/2}}{\mathcal{E}} \times \theta \left( \frac{3,62 \cdot 10^{-4} \mathcal{E}^{1/2}}{e\varphi} \right) \right].$$

Отсюда видно, что ПЭ зависит от электрического поля так же, как ТЭ зависит от температуры:  $\ln(j/\mathcal{E}^2) = f(1/\mathcal{E})$  (рис. 25.47). При высоких температурах плотность тока ПЭ возрастает с  $T$ , особенно сильно в области малых (но уже вызывающих ПЭ) электрических полей. Распределение по энергиям электронов, эмитируемых из металла, при ПЭ при низких температурах эмиттера начинается от энергии, соответствующей уровню Ферми в металле (принимаемому за нуль), и простирается в область отрицательных энергий. Ширина распределения на половине высоты составляет около 0,5 эВ (рис. 25.48). При возрастании температуры энергетический спектр эмитируемых электронов расширяется в сторону положительных энергий. ПЭ полупроводников обладает рядом особенностей, связанных с распределением электронов по энергиям в них, с проникновением внешнего электрического поля в полупроводник и с сильной термо- и фоточувствительностью полупроводников, оказывающей влияние на ток ПЭ (рис. 25.49) [28, 29]. Токи ПЭ с большой плотностью удается получать с эмиттеров, имеющих форму острия. Предельная плотность тока, еще не разрушающего острие,  $j_{кр}$  возрастает с увеличением угла при вершине эмитирующего конуса, так как с увеличением этого угла улучшается отвод теплоты от острия (табл. 25.27, рис. 25.50). В очень сильных электрических полях, когда плотность тока ПЭ достигает  $10^8$ – $10^9 A/cm^2$ , локальные участки катода, из которых происходит эмиссия, (острия) в результате сильного разогрева взрываются, образуя плотную плазму, расширяющуюся со скоростью  $v \approx 10^6$  см/с. Этот процесс сопровождается возникновением интенсивной эмиссии (взрывная электронная эмиссия, рис. 25.51) [30]. Ток  $I$ , А, взрывной электронной эмиссии при взрыве одиночного острия

$$I = 3,7 \cdot 10^{-5} U^{3/2} vt / (d - vt),$$

где  $U$  — напряжение между катодом и анодом в процессе взрывной эмиссии, В;  $d$  — расстояние между ними, см;  $t$  — время от момента приложения импульса напряжения ( $t < d/v$ ).

ПЭ используется в некоторых вакуумных электронных приборах, в полевой электронной и ионной микроскопии, взрывная электронная эмиссия — в сильноточных ускорителях электронов и в импульсных источниках рентгеновского излучения высокой интенсивности [30].

Таблица 25.26. Функция Нордгейма  $\theta(y)$  [27]

| $y$  | $\theta(y)$ | $y$  | $\theta(y)$ |
|------|-------------|------|-------------|
| 0    | 1,0000      | 0,55 | 0,6351      |
| 0,05 | 0,9948      | 0,6  | 0,5768      |
| 0,1  | 0,9817      | 0,65 | 0,5152      |
| 0,15 | 0,9622      | 0,7  | 0,4504      |
| 0,2  | 0,9370      | 0,75 | 0,3825      |
| 0,25 | 0,9068      | 0,8  | 0,3117      |
| 0,3  | 0,8718      | 0,85 | 0,2379      |
| 0,35 | 0,8322      | 0,9  | 0,1613      |
| 0,4  | 0,7888      | 0,95 | 0,0820      |
| 0,45 | 0,7413      | 1    | 0           |
| 0,5  | 0,6900      |      |             |

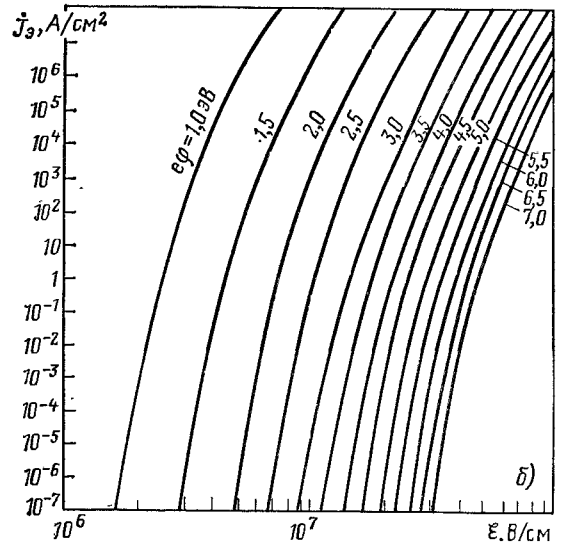
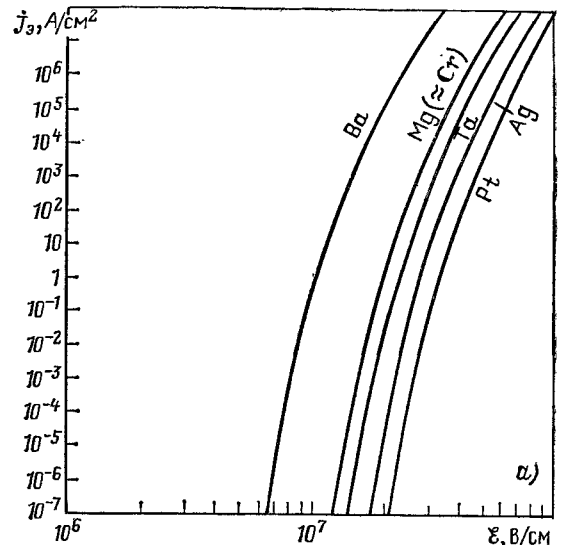


Рис. 25.47. Зависимость плотности тока ПЭ от напряженности электрического поля для некоторых металлов (а) и эмиттеров с различной работой выхода (б) [6]

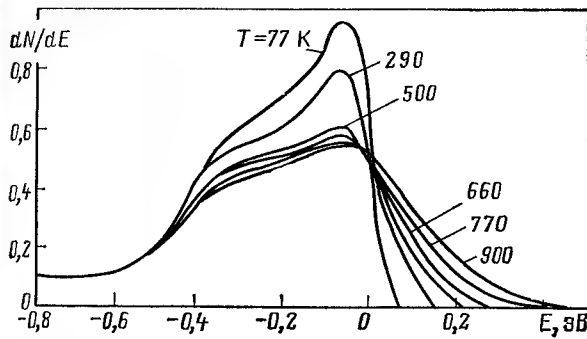


Рис. 25.48. Распределение по энергиям электронов при ПЭ из вольфрамового острия с ориентацией по оси  $\langle 100 \rangle$  при различных температурах эмиттера [31]

Таблица 25.27. Значения экспериментально измеренных предельных плотностей токов ПЭ с одноострийных катодов [28]

| Материал катода  | Длительность прикладываемого напряжения, с | Предельная плотность тока, А/см <sup>2</sup> |
|------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| W                | Постоянно действующее напряжение           | $10^7$                                       |
| W                | $10^{-10}-10^{-8}$                         | $2 \cdot 10^7$                               |
| W                | $10^{-5}-10^{-6}$                          | $5 \cdot 10^7-10^8$                          |
| W                | $10^{-7}$                                  | $3 \cdot 10^8-5 \cdot 10^8$                  |
| W                | $10^{-8}-10^{-9}$                          | $10^9$                                       |
| W-Zr             | $4 \cdot 10^{-6}$                          | $1 \cdot 10^9-5 \cdot 10^9$                  |
| Ta, Re           | $4 \cdot 10^{-6}$                          | $5 \cdot 10^7$                               |
| LaB <sub>6</sub> | $3 \cdot 10^{-6}$                          | $10^7-10^8$                                  |
| ZrC              | $3 \cdot 10^{-6}$                          | $10^7-10^8$                                  |

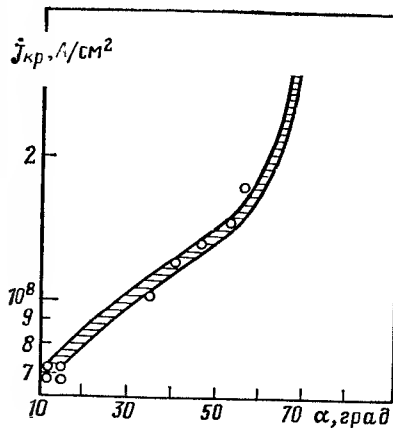


Рис. 25.50. Зависимость критической (наибольшей неразрушающей эмиттер) плотности тока ПЭ металлического острия от угла раствора конуса катода [28]. Материал катода — вольфрам, длительность импульсов тока 3,5 мкс, частота повторения 50 с<sup>-1</sup>:  
кружки — эксперимент, заштрихованная полоса — расчет

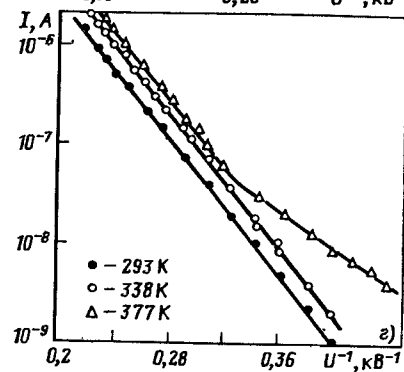
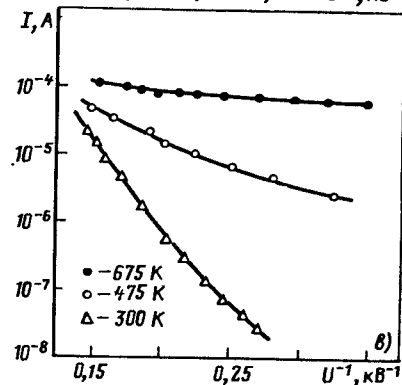
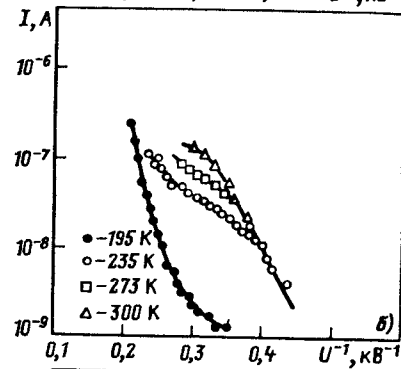
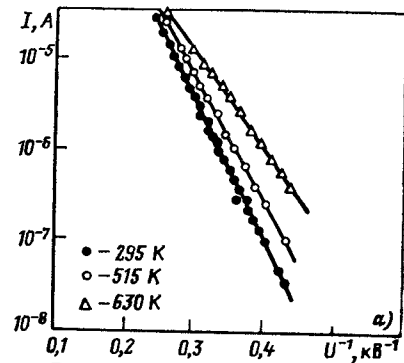


Рис. 25.49. Вольт-амперные характеристики тока ПЭ полупроводников при различных температурах [29]:  
а — низкоомный германий n-типа; б — высокоомный германий p-типа; в — сульфид цинка; г — сульфид кадмия

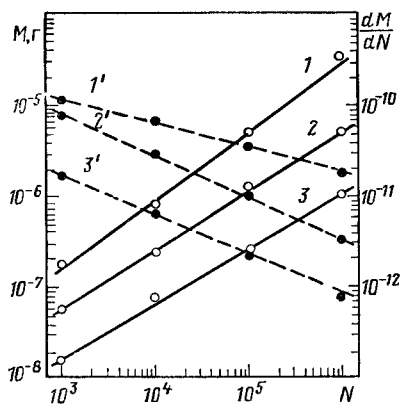


Рис 25.51. Расход массы медных острий  $M$  при многократных включениях тока взрывной полевой эмиссии [30]:

$N$  — число включений,  $U=30$  кВ; расстояние катод-анод 3 мм; угол раствора конуса катода  $\alpha=6^\circ$ ; 1, 3 —  $M(N)$ ; 1', 3' —  $dM/dN$ . Длительности импульсов: 1, 1'— $5 \cdot 10^{-8}$  с; 2, 2'— $2 \cdot 10^{-8}$  с; 3, 3'— $5 \cdot 10^{-9}$  с

## 25.7. ИОННАЯ И ИОННО-ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Ионная эмиссия — испускание телом ионов химических элементов, входящих в состав тела, при его нагревании (термоионная эмиссия) или при бомбардировке его поверхности другими частицами: электронами

(электронно-ионная эмиссия), ионами (вторичная ионная эмиссия) или при облучении фотонами (фотодезорбция). Под действием ионной бомбардировки может возникнуть также электронная эмиссия (ионно-электронная эмиссия, табл. 25.28 и рис. 25.52). Интенсивную термоионную эмиссию обнаруживают тела с каркасно-полостной структурой кристаллической решетки (цеолиты, алюмосиликаты и другие), в полости которой введены атомы щелочных металлов. Эти атомы слабо связаны с основной решеткой и могут при нагревании легко перемещаться внутри тела, диффундируя к поверхности и испаряясь с нее. На основе таких материалов изготавливаются эффективные твердотельные источники ионов (табл. 25.29 и рис. 25.53, 25.54). При вторичной ионной эмиссии некоторая доля частиц эмитируется в виде нейтральных атомов.

Основные характеристики ионной эмиссии:  $j_i$  — плотность ионного тока;  $S$  — коэффициент распыления — отношение общего числа распыленных частиц (нейтральных и ионизованных) к числу первичных ионов;  $K^+$  — коэффициент вторичной ионной эмиссии — отношение числа вторичных ионов с определенным отношением заряда к массе к числу первичных ионов (для неэлементарных мишеней под коэффициентом вторичной ионной эмиссии понимают величину  $\gamma_i^+ =$

$= K^+/C_i$ , где  $C_i$  — относительная концентрация атомов  $i$ -го сорта в мишени);  $\beta^+ = K^+/S$  — коэффициент ионизации (табл. 25.30—25.32). Вторичная ионная эмиссия широко используется в масс-спектропии вторичных ионов для анализа состава приповерхностных слоев твердых тел [34].

Таблица 25.28. Коэффициенты ионно-электронной эмиссии металлов  $\gamma$ , электрон/ион [35] (данные получены графической интерполяцией между экспериментально измеренными значениями)

| Мишень | Первичный ион               | Энергия первичных ионов, кэВ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|-----------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |                             | 2                            | 3     | 4     | 7     | 10    | 15    | 20    | 30    | 40    | 50    |
| Li     | H <sup>+</sup>              | 0,475                        | 0,560 | 0,650 | 0,830 | 0,965 | 1,12  | 1,23  | 1,36  | 1,46  | 1,55  |
|        | H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,260                        | 0,320 | 0,365 | 0,465 | 0,550 | 0,680 | 0,775 | 0,945 | 1,07  | 1,16  |
|        | He <sup>+</sup>             | 0,465                        | 0,525 | 0,590 | 0,740 | 0,880 | 1,10  | 1,27  | 1,54  | 1,77  | 1,95  |
| Al     | H <sup>+</sup>              | 0,225                        | 0,310 | 0,380 | 0,560 | 0,700 | 0,875 | 1,01  | 1,23  | 1,34  | 1,38  |
|        | H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,087                        | 0,132 | 0,156 | 0,230 | 0,310 | 0,450 | 0,555 | 0,745 | 0,885 | 0,955 |
|        | He <sup>+</sup>             | 0,280                        | 0,330 | 0,380 | 0,510 | 0,620 | 0,765 | 0,885 | 1,10  | 1,31  | —     |
| Cr     | H <sup>+</sup>              | 0,280                        | 0,360 | 0,430 | 0,580 | 0,710 | 0,880 | 1,04  | 1,26  | 1,36  | 1,42  |
|        | H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,240                        | 0,270 | 0,305 | 0,375 | 0,450 | 0,540 | 0,635 | 0,810 | 0,940 | 1,01  |
|        | He <sup>+</sup>             | 0,310                        | 0,420 | 0,485 | 0,650 | 0,780 | 0,960 | 1,10  | 1,42  | 1,69  | 1,94  |
| Cu     | H <sup>+</sup>              | —                            | 0,420 | 0,480 | 0,650 | 0,780 | 0,960 | 1,08  | 1,29  | 1,45  | 1,57  |
|        | H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,162                        | 0,210 | 0,265 | 0,380 | 0,470 | 0,580 | 0,670 | 0,830 | 0,960 | 1,08  |
|        | He <sup>+</sup>             | —                            | 0,390 | 0,455 | 0,620 | 0,800 | 1,04  | 1,18  | 1,44  | 1,70  | —     |
| Ag     | H <sup>+</sup>              | —                            | 0,650 | 0,810 | 1,15  | 1,42  | 1,70  | 1,89  | 2,17  | 2,33  | —     |
|        | H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,225                        | 0,295 | 0,375 | 0,610 | 0,800 | 1,03  | 1,20  | 1,50  | 1,67  | 1,78  |
|        | He <sup>+</sup>             | 0,360                        | 0,450 | 0,570 | 0,910 | 1,21  | 1,65  | 2,00  | 2,50  | 2,89  | —     |
| Au     | H <sup>+</sup>              | 0,360                        | 0,540 | 0,680 | 0,980 | 1,22  | 1,46  | 1,64  | 1,77  | 2,03  | 2,15  |
|        | H <sub>2</sub> <sup>+</sup> | 0,138                        | 0,240 | 0,325 | 0,550 | 0,720 | 0,930 | 1,09  | 1,38  | 1,59  | 1,70  |
|        | He <sup>+</sup>             | 0,315                        | 0,410 | 0,510 | 0,810 | 1,09  | 1,52  | 1,83  | 2,34  | 2,68  | —     |

| Мишень | Первичный ион  | Энергия первичных ионов, кэВ |      |      |      |      |      |      |           |
|--------|----------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
|        |                | 50                           | 75   | 100  | 125  | 150  | 175  | 200  | 225       |
| W      | H <sup>+</sup> | 1,54                         | 1,62 | 1,64 | 1,65 | 1,64 | 1,61 | 1,56 | 1,53 [36] |

Таблица 25.29. Термоионные свойства цеолитов и алюмосиликатов щелочных металлов [33]

| Материал                                                                                  | $T, ^\circ\text{C}$ | Эмитируемые ионы | Плотность ионного тока, $\text{mA}/\text{cm}^2$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------------------|
| Цеолит                                                                                    | 1100                | $\text{Cs}^+$    | 12                                              |
| Алюмосиликат Li ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) | 1100                | $\text{Li}^+$    | 0,6                                             |
| Алюмосиликат Rb ( $\text{Rb}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) | 1160                | $\text{Rb}^+$    | 0,4                                             |
| Алюмосиликат Rb + Mo (10%)                                                                | 1160                | $\text{Rb}^+$    | 2—5                                             |
| Алюмосиликат Na ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) | 1200                | $\text{Na}^+$    | 2                                               |
| Алюмосиликат Na + W (10%)                                                                 | 1200                | $\text{Na}^+$    | 20                                              |

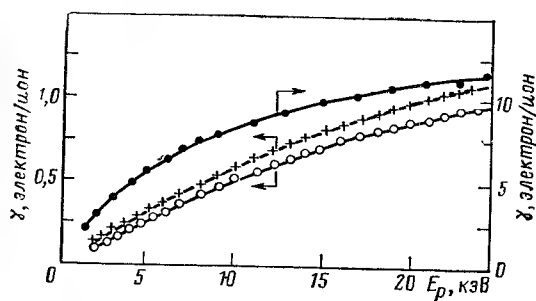


Рис. 25.52. Зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии  $\gamma$  при бомбардировке мишеней ионами аргона  $^{40}\text{Ar}^+$  от энергии первичных  $E_p$  [23]:

крестики — поликристаллический молибден; светлые кружки — поверхности (111) монокристалла германия; темные кружки — монокристалл хлористого натрия. Измерения проведены при давлении  $p < 10^{-8}$  Па. Поверхности мишеней подвергнуты ионному травлению в вакууме ( $p \sim 10^{-7}$  Па) при  $T = 350^\circ\text{C}$  (Ge и NaCl), молибденовая мишень предварительно отожжена при таком же давлении при  $T = 1700$  К.

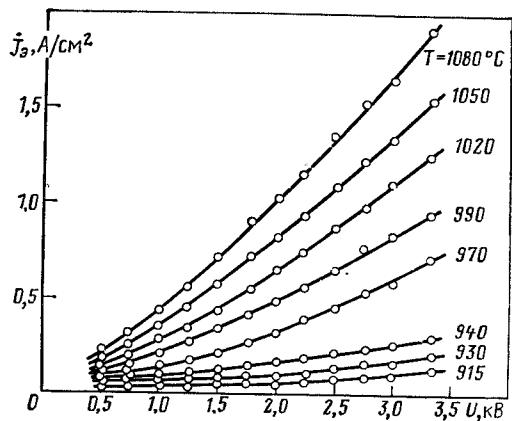


Рис. 25.53. Вольт-амперные характеристики источника ионов цезия из алюмосиликата цезия ( $\text{Cs}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) в импульсном режиме при различных температурах катода [32]. Расстояние катод—анод 2 мм, длительность импульсов тока 10 мкс, частота повторения  $25 \text{ c}^{-1}$

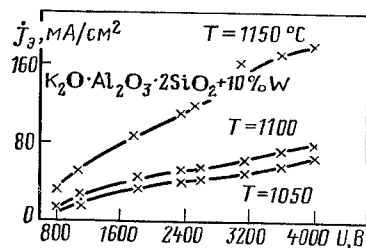


Рис. 25.54. Вольт-амперные характеристики источника ионов  $\text{K}^+$  на основе алюмосиликата калия с присадкой вольфрама ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 10\% \text{W}$ ) в импульсном режиме при разных температурах источника [33]. Значения ионного тока усреднены по импульсу. Длительность импульсов 700 мкс, частота повторения  $10 \text{ c}^{-1}$

Таблица 25.30. Основные параметры вторичной ионной эмиссии пленок чистых металлов [34]

| Первичный ион  | Параметр                    | Металл |      |      |      |      |      |      |       |
|----------------|-----------------------------|--------|------|------|------|------|------|------|-------|
|                |                             | Al     | Ti   | Mn   | Ni   | Cu   | Sn   | Ta   | Au    |
| $\text{Ar}^+$  | $\beta^+, 10^{-4}$ ион/атом | 110    | 92   | 22   | 6,4  | 1,9  | 0,66 | 6,9  | 0,056 |
|                | $S, \text{ атом/ион}$       | 3,7    | 2,3  | 3,5  | 6,1  | 8,5  | 8,3  | 2,9  | 12    |
|                | $K^+, 10^{-4}$ ион/ион      | 410    | 212  | 77   | 39   | 16   | 565  | 20   | 0,71  |
| $\text{He}^+$  | $\beta^+, 10^{-4}$ ион/атом | —      | 337  | 26,8 | 9,8  | 4,73 | 4,15 | 50   | 0,185 |
|                | $S, \text{ атом/ион}$       | —      | 0,8  | 1,1  | 1,5  | 1,9  | 2,8  | 0,68 | 3,2   |
|                | $K^+, 10^{-4}$ ион/ион      | —      | 270  | 29,8 | 14,7 | 9    | 11,6 | 34   | 0,59  |
| $\text{O}_2^+$ | $\beta^+, 10^{-4}$ ион/атом | 9600   | 5900 | 265  | 63,5 | 14   | 9,3  | 250  | 0,32  |
|                | $S, \text{ атом/ион}$       | 1,6    | 1,1  | 2,3  | 3,3  | 4,3  | 5,1  | 1,1  | 6,5   |
|                | $K^+, 10^{-4}$ ион/ион      | 15300  | 5900 | 610  | 210  | 60   | 47,5 | 275  | 2,08  |

Таблица 25.31. Относительные коэффициенты вторичной ионной эмиссии наиболее распространенных металлов при бомбардировке ионами  $Ag^+$ ,  $He^+$  и  $O^+$  (энергия первичных ионов 8 кэВ, за эталон принято железо при бомбардировке ионами  $Ag^+$  [34], элементы расположены по латинскому алфавиту)

| Элемент | Первичный ион |        |       | Элемент | Первичный ион |        |       |
|---------|---------------|--------|-------|---------|---------------|--------|-------|
|         | $Ag^+$        | $He^+$ | $O^+$ |         | $Ag^+$        | $He^+$ | $O^+$ |
| Ag      | 0,108         | 0,07   | 0,135 | Dy      | 1,88          | 2,84   | 23,1  |
| Al      | 9,62          | 62,2   | 447   | Er      | 4,50          | 2,03   | 15,8  |
| Au      | 0,012         | 0,025  | 0,051 | Fe      | 1,00          | 0,872  | 15,8  |
| Be      | 2,19          | 15,5   | 163   | Gd      | 2,28          | 1,47   | 13,2  |
| Bi      | 0,358         | 0,13   | 0,464 | Hf      | 2,25          | 1,33   | 8,58  |
| Cd      | 0,019         | 0,016  | 0,106 | Ho      | 2,88          | 3,03   | 21,4  |
| Ce      | 0,40          | 0,773  | 14,7  | In      | 1,50          | 30     | 53,8  |
| Co      | 1,22          | 0,37   | 5,97  | Y       | 2,87          | 8,4    | 51,2  |
| Cr      | 1,01          | 2,95   | 41,6  | Yb      | 1,05          | 2,8    | 25,2  |
| Cu      | 0,262         | 0,235  | 1,26  | La      | 0,49          | 0,725  | 12,8  |

| Элемент | Первичный ион |        |       | Элемент | Первичный ион |        |       |
|---------|---------------|--------|-------|---------|---------------|--------|-------|
|         | $Ag^+$        | $He^+$ | $O^+$ |         | $Ag^+$        | $He^+$ | $O^+$ |
| Lu      | 15,6          | 2,64   | 16,6  | Sm      | 0,275         | 1,84   | 19,5  |
| Mg      | 11,4          | 13,3   | 86    | Sn      | 0,094         | 0,202  | 0,558 |
| Mn      | 2,15          | 0,95   | 13,5  | Ta      | 0,186         | 0,853  | 5,43  |
| Mo      | 0,385         | 1,86   | 25,2  | Tb      | 7,00          | 3,63   | 23,8  |
| Nb      | 1,16          | 4,05   | 35,6  | Ti      | 1,56          | 7,14   | 127   |
| Nd      | 4,13          | 1,11   | 17,8  | Tu      | 1,68          | 6,7    | 22,1  |
| Ni      | 0,98          | 0,415  | 4,42  | V       | 2,75          | 13,1   | 200   |
| Pb      | 0,086         | 1,08   | 1,22  | W       | 0,187         | 0,447  | 5,83  |
| Pd      | 0,042         | 0,033  | 1,55  | Zn      | 0,034         | 0,107  | 0,918 |
| Pt      | 0,112         | 0,013  | 0,076 | Zr      | 0,296         | 2,08   | 28,2  |
| Pr      | 1,03          | 2,61   | 22,2  |         |               |        |       |
| Re      | 0,65          | 2,14   | 20,5  |         |               |        |       |
| Rh      | 0,89          | 0,556  | 24    |         |               |        |       |
| Ru      | 0,76          | 0,724  | 20,6  |         |               |        |       |
| Sc      | 7,75          | 31     | 205   |         |               |        |       |

Таблица 25.32. Основные параметры вторичной ионной эмиссии карбидов [34] (бомбардировка первичными ионами  $Ag^+$  с энергией 8 кэВ, плотность потока первичных ионов  $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>)

| Параметр        | TiC   | VC    | CrC <sub>2</sub> | ZrC   | NbC   | MoC   | HfC   | TaC   | WC    |
|-----------------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S               | 3,0   | 2,9   | 3,3              | 2,3   | 2,9   | 2,9   | 4,0   | 2,8   | 2,5   |
| $\gamma_{Me}^+$ | 21,0  | 24    | 14               | 2,7   | 6,7   | 1,9   | 1,3   | 0,82  | 0,52  |
| $\gamma_C^+$    | 0,056 | 0,034 | 0,033            | 0,047 | 0,054 | 0,030 | 0,056 | 0,030 | 0,080 |
| $\beta_{Me}^+$  | 0,20  | 0,24  | 0,12             | 0,033 | 0,067 | 0,018 | 0,009 | 0,008 | 0,006 |
| $\beta_C^+$     | 0,007 | 0,005 | 0,004            | 0,008 | 0,007 | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,012 |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.
- Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов: Справочник. — 4-е изд. Киев: Наукова думка, 1981.
- Michaelson H. B.//J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No 11. P. 4729—4733
- Электрические и эмиссионные свойства сплавов/Е. М. Савицкий, И. В. Буров, С. В. Пирогова, Л. Н. Литвак. М.: Наука, 1978.
- Haas G. A., Shin A., Marrian C. R. K.//Appl. Surface Sci. 1983. Vol. 16, No 1—2. P. 139—162.
- Ardenne M. Tabellen zur Angewandten Physik Auflage. Berlin: VEB Verlag der Wissenschaften, 1962. Bd. 1.
- Термоэлектронные катоды/Г. А. Кудинцева, А. И. Мельников, А. В. Морозов, Б. П. Никонов. М.: Энергия, 1966.
- Futamoto M., Nakazawa M., Usami K. e. a.//J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, No 7. P. 3869—3876.
- Houston J. M., Webster H. F.//Advances in Electronics and Electron Phys. 1962. Vol. 17. P. 125—206.
- Lipeles R. A., Kap H. K. A.//Appl. Surface Sci. 1983. Vol. 16. No 1—2. P. 189—206.
- Кульварская Б. С.//Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15, № 8. С. 1717—1720.
- Никонов Б. П. Оксидный катод. М.: Энергия, 1979.
- Soukup R. J.//J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No 3. P. 1098—1100
- Ашкинази Л. А., Соболева Н. А.//Итоги науки и техники. Сер. Электроника. 1983. Т. 15. С. 154—216.
- Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1974.
- Соммер А. Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М.: Энергия, 1973.
- Белл Р. Л. Эмиттеры с отрицательным электронным родством: Пер. с англ. М.: Энергия, 1978.
- Escher J. S.//Semiconductors and Semimetals. 1981. Vol. 15. P. 195—300.
- Escher J. S., Bell R. L., Gregory P. E. e. a.//IEEE Trans. Electron Devices. 1980. Vol. ED-27. P. 1244—1259.
- Fischer D. G., Enstrom R. E., Escher J. E. e. a.//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43, No 9. P. 3815—3823.
- Howorth J. R., Folkes J. R., Palmer J. C.//J. Phys. D. Appl. Phys. 1976. Vol. 9, No 5. P. 785—794.
- Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969.
- Электронная и ионная спектроскопия твердых тел/Под ред. Л. Фирменса, Дж. Венника, В. Декейсера: Пер. с англ. М.: Мир, 1981.
- Гаванин В. А., Кутенин Ю. Д.//Итоги науки и техники. Сер. Электроника и ее применение. 1980. Т. 12. С. 43—81.

25. Martinelli R. U. // Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17, No 8. P. 313—314.
26. Martinelli R. U., Schultz M. L., Gossenberger H. F. // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43, No 11. P. 4803—4804.
27. Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз, 1958.
28. Ненакаливаемые катоды / Под ред. М. И. Елинсона. М.: Сов. радио, 1974.
29. Фишер Р., Нойман Х. Автоэлектронная эмиссия полупроводников: С дополнительным обзором Г. Н. Фурсея и О. И. Львова. М.: Наука, 1971.
30. Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Преображенский Д. И. // Успехи физ. наук. 1975. Т. 115, № 1. С. 101—120.
31. Swanson L. W., Crouser L. C. // Phys. Rev. 1967 Vol. 163, No 2. P. 622—631.
32. Кульварская Б. С., Кан Х. С., Доценко В. Г. // Тез. докл. V Всесоюз. симп. по сильноточной электронике. Томск: Ин-т сильноточной электроники СО АН СССР, 1984. Ч. 1.
33. Кульварская Б. С. // Итоги науки и техники. Сер. Электроника. 1981. Т. 13. С. 111—149.
34. Черепин В. Т. Ионный зонд. Киев: Наукова думка, 1981.
35. Baragiola R. A., Alonso E. A., Oliva Florio A. // Phys. Rev. B. 1979. Vol. 19, No 1. P. 121—129.
36. Ewing R. I. // Phys. Rev. 1965. Vol. 139, No 6A. P. 1840—1843.
37. Photoemission in Solids // Ed. by M. Cardona, L. Ley: Topics in Applied Physics. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 1978.
38. Handbook of Auger electron Spectroscopy / P. W. Palmberg, G. E. Riach, Weber R. E. Edina: Phys. Electron. Industry, 1975.
39. Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy / C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis. Minnesota, USA: Perkin-Elmer Corp., 1979.
40. Hoene E. L. // Aev. Electron. Electron. Phys. 1972. Vol. 33A. P. 369—380.
41. Аршавский А. Н., Голубев Г. П., Кауфман И. Х. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 8. С. 1580—1587.

## Глава 26

# МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ

В. Ю. Иванов, Л. И. Винокурова

Ниже приведены магнитные характеристики веществ, не обладающих (в отсутствие магнитного поля) атомной магнитной структурой: простых элементов, наиболее известных неорганических соединений, а также некоторых важных для практики соединений (силициды, селениды, теллуриды и др.).

В слабых магнитных полях ( $\mu_B H \ll kT$ , где  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура) намагниченность  $I$  таких веществ возрастает прямо пропорционально напряженности поля:  $I = \chi_v H$ , где  $\chi_v$  — магнитная восприимчивость единицы объема.

Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью называют диамагнитными ( $\chi_v < 0$ ). Причиной диамагнетизма является электромагнитная индукция молекулярных токов, вызываемая в электронных оболочках атомов внешним магнитным полем. Явление диамагнетизма присуще всем веществам без исключения.

Парамагнетизм ( $\chi_v > 0$ ) характерен для веществ, частицы которых (атомы, молекулы, ионы, атомные ядра) обладают собственными магнитными моментами, но в отсутствие внешнего магнитного поля эти моменты ориентированы хаотически, так что в целом  $I = 0$ . Во внешнем поле магнитные моменты атомов парамагнитных веществ ориентируются преимущественно по полю. Если поле очень велико ( $\mu_B H \gg kT$ ), то все магнитные моменты парамагнитных частиц ориентированы строго по полю (магнитное насыщение).

С повышением температуры вследствие дезориентирующего действия теплового движения частиц магнитная восприимчивость убывает — в простейшем случае по закону Кюри:  $\chi_v = C/T$ , где  $C$  — постоянная Кюри,

$C = \frac{N p_{\text{эф}}^2 \mu_B^2}{3k}$ . Здесь  $p_{\text{эф}}$  — эффективный магнитный момент на молекулу;  $N$  — число молекул в единице объема.

Для веществ, в которых носители магнитного момента взаимодействуют между собой и с внутрикристаллическим полем, температурная зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков следует закону Кюри — Вейсса:  $\chi_v = C'/(T - \theta)$ , где постоянная  $C'$  во многих случаях практически совпадает с постоянной  $C$  в законе Кюри для свободных магнитных ионов данного вида; постоянная  $\theta$  характеризует взаимодействие магнитных ионов между собой и с внутрикристаллическим полем. Закон Кюри — Вейсса выполняется обычно в определенной области температур. При низких температурах (ниже  $T \approx 70$  K) наблюдаются отклонения от него, вызванные влиянием неоднородных электрических полей соседних ионов или ориентированных диполей молекул растворителя на орбитальный момент электронов. Закон Кюри — Вейсса выполняется также для ферро- и антиферромагнетиков в некотором интервале температур выше температуры магнитного упорядочения.

Парамагнитными могут быть и химические соединения с ионами, не обладающими магнитным моментом в основном состоянии. В этих соединениях парамагнетизм связан с квантовомеханическими поправками, обусловленными примесью возбужденных состояний с магнитным моментом. Такой парамагнетизм (поляризационный или парамагнетизм Ван Флека) не зависит от температуры.

В металлах вклад в парамагнитную восприимчивость, обусловленный спинным парамагнетизмом



электронов проводимости (парамагнетизм Паули), почти не зависит от температуры.

Парамагнитная восприимчивость полупроводников, обусловленная примесными носителями, в простейшем случае зависит от температуры экспоненциально:  $\chi_v = AT^{1/2} \exp(-\Delta E/(2kT))$ , где  $A$  — константа вещества;  $\Delta E$  — ширина запрещенной зоны полупроводника.

Для характеристики магнитных свойств веществ обычно используют удельную магнитную восприимчивость (т. е. магнитную восприимчивость на единицу массы):  $\chi = \chi_v/\rho$ , где  $\rho$  — плотность вещества. Часто магнитную восприимчивость относят к одному молю вещества ( $\chi_m$ ). Между величинами  $\chi$  и  $\chi_m$  существует следующее соотношение:  $\chi_m = \chi M$ , здесь  $M$  — относительная молекулярная масса.

В табл. 26.1 приведены значения удельной магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ, для которых температурная зависимость восприимчивости не описывается законом Кюри — Вейсса.

В табл. 26.2 приведены значения восприимчивости в основном при комнатной температуре некоторых парамагнетиков, температурная зависимость восприимчивости которых удовлетворяет закону Кюри — Вейсса. Сделана попытка ограничиться лишь теми веществами, в которых не обнаружено магнитное упорядочение при низких температурах (по крайней мере выше 4,2 К).

Значения  $\chi$  в таблицах даны в СИ ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ). Для пересчета в СГСМ ( $\text{см}^3/\text{г}$ ) нужно значение  $\chi$ , выраженное в СИ, умножить на  $10^3$ .

В таблицах при отсутствии дополнительных обозначений приведены данные для твердого поликристаллического состояния. В других случаях приняты сокращения: (м/к) — монокристаллическое состояние (в случае, когда для вещества приведены данные для монокристаллического и поликристаллического состояний, во избежание ошибок специально выделено значение поликристаллического состояния — (п/к);  $\chi_{||}$  и  $\chi_{\perp}$  — восприимчивости, измеренные вдоль и перпендикулярно оси наиболее высокой симметрии;  $\chi_a$ ,  $\chi_b$ ,  $\chi_c$  — восприимчивости вдоль направлений векторов трансляций элементарной ячейки данной кристаллической решетки; (г) — газообразное, (ж) — жидкое, (тв) — твердое состояние; (р) — раствор;  $p$  — концентрация дырок в полупроводнике;  $n$  — концентрация электронов в полупроводнике;  $T_{пл}$  — температура плавления;  $T_{исп}$  — температура испарения;  $\Delta T$  — интервал температур, в котором температурная зависимость  $\chi$  следует закону Кюри — Вейсса, прочерк в таблицах означает, что значение температуры измерения в оригинальной работе не приведено.

Детальные сведения о явлениях диамагнетизма и парамагнетизма веществ можно найти в следующих монографиях: Я. Г. Дорфман «Магнитные свойства и строение веществ», М., 1955; Ч. Киттель «Введение в физику твердого тела», пер. с англ., М., 1978; С. В. Вонсовский «Магнетизм», М., 1971. Некоторые физические свойства элементов, в том числе и кристаллические структуры, приведены в монографии В. И. Чечерникова «Магнитные измерения», Изд-во МГУ, 1969.

Таблица 26.1. Значения магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ

| Вещество                                          | $T$ , К | $\chi$ , $10^{-9}$ $\text{м}^3/\text{кг}$ | Литература |
|---------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|------------|
| $\text{H}_2$                                      | —       | —1,974                                    | [1]        |
| $\text{H}_2$                                      | 293     | —1,9867                                   | [2]        |
| $\text{H}_2$                                      | 90      | —1,97                                     | [2]        |
| $\text{H}_2$                                      | 20      | —2,7 (ж)                                  | [3]        |
| $\text{H}_3\text{AsO}_3$                          | 293     | —0,406 (тв)                               | [4]        |
| $\text{H}_3\text{BO}_3$                           | 298     | —0,55                                     | [1]        |
| $\text{HBr}$                                      | 273     | —0,407 (ж)                                | [5]        |
| $\text{HCl}$                                      | 273     | —0,62 (ж)                                 | [1]        |
| $\text{HF}$                                       | 287     | —0,43 (ж)                                 | [1]        |
| $\text{HI}$                                       | 281     | —0,373 (ж)                                | [1]        |
| $\text{HI}$                                       | 195     | —0,370                                    | [1]        |
| $\text{HIO}_3$                                    | 298     | —0,27                                     | [1]        |
| $\text{HIO}_4$                                    | 298     | —0,294                                    | [1]        |
| $\text{HNO}_3$                                    | 298     | —0,316                                    | [1]        |
| $\text{H}_2\text{O}^{*1}$                         | 273     | —0,7019 (тв)                              | [1]        |
| $\text{H}_2\text{O}^{*1}$                         | 273     | —0,7177 (ж)                               | [1]        |
| $\text{H}_2\text{O}^{*1}$                         | 293     | —0,7199 (ж)                               | [1]        |
| $\text{H}_2\text{O}^{*1}$                         | 373     | —0,72454 (ж)                              | [1]        |
| $\text{H}_2\text{O}^{*1}$                         | >373    | —0,727 (г)                                | [1]        |
| $\text{H}_2\text{O}_2$                            | 298     | —0,015                                    | [1]        |
| $\text{H}_3\text{PO}_3$                           | 298     | —0,518 (р)                                | [1]        |
| $\text{H}_3\text{PO}_4$                           | 298     | —0,447 (р)                                | [1]        |
| $\text{H}_2\text{S}$                              | 298     | —0,748                                    | [1]        |
| $\text{H}_2\text{SO}_4$                           | 298     | —0,406                                    | [1]        |
| $\text{H}_2\text{SeO}_3$                          | 298     | —0,352 (тв)                               | [1]        |
| $\text{H}_2\text{SeO}_4$                          | 298     | —0,353                                    | [1]        |
| $\text{H}_2\text{TeO}_3$                          | 288     | —0,24                                     | [7]        |
| $\text{H}_2\text{TeO}_4$                          | 291     | —0,43                                     | [7]        |
| $\text{D}_2$                                      | —       | —0,994 (г)                                | [8]        |
| $\text{DH}$                                       | —       | —1,325 (г)                                | [8]        |
| $\text{DHO}$                                      | 302     | —0,682 (ж)                                | [1]        |
| $\text{D}_2\text{O}$                              | 276,8   | —0,626 (тв)                               | [1]        |
| $\text{D}_2\text{O}$                              | 276,8   | —0,632 (ж)                                | [1]        |
| $\text{D}_2\text{O}$                              | 293     | —0,637 (ж)                                | [1]        |
| $\text{He}$                                       | 298     | —0,47                                     | [1]        |
| $\text{Li}^{*2}$                                  | 298     | 2,04                                      | [10]       |
| $\text{Li}^{*2}$                                  | 298     | 3,35                                      | [9]        |
| $\text{LiBr}$                                     | 298     | —0,400                                    | [1]        |
| $\text{LiBrO}_3$                                  | 298     | —0,289                                    | [1]        |
| $\text{Li}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)$       | 298     | —0,513                                    | [1]        |
| $\text{Li}_2\text{CO}_3$                          | 298     | —0,365                                    | [1]        |
| $\text{LiCl}$                                     | 298     | —0,573                                    | [1]        |
| $\text{LiClO}_3$                                  | 298     | —0,319 (р)                                | [1]        |
| $\text{LiF}$                                      | 298     | —0,389                                    | [1]        |
| $\text{LiH}$                                      | 298     | —0,79                                     | [1]        |
| $\text{LiI}$                                      | 298     | —0,37                                     | [1]        |
| $\text{LiIO}_3$                                   | 298     | —0,26                                     | [1]        |
| $\text{LiNO}_3$                                   | 292     | —0,48                                     | [7]        |
| $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$         | 298     | —0,504                                    | [1]        |
| $\text{Li}_2\text{O}$                             | 293     | —0,57                                     | [7]        |
| $\text{LiOH}$                                     | 298     | —0,516                                    | [1]        |
| $\text{Li}_2\text{SO}_4$                          | 298     | —0,364                                    | [1]        |
| $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 290     | —0,43                                     | [7]        |
| $\text{Be}^{*3}$ (м/к) $\chi_{  }$                | 293     | —2,38                                     | [11]       |
| $\text{Be}^{*3}$ (м/к) $\chi_{\perp}$             | 293     | —0,80                                     | [11]       |
| $\text{Be}$ (п/к)                                 | 103     | —0,75                                     | [12]       |
| $\text{Be}$                                       | 291     | —1,0                                      | [1; 12]    |

\*1 Температурный коэффициент  $T/\chi \cdot d\chi/dT$  уменьшается от  $2,9 \times 10^{-4}$  при 278 К до  $0,62 \cdot 10^{-4}$  при 343 К [6].

\*2 При уменьшении температуры от 298 К до 78 К  $\chi$  увеличивается на 1,3% [9].

\*3 См. рис. 26.1.

| Вещество                                                      | T, К   | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>2</sup> /кг | Литература | Вещество                                                          | T, К  | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>2</sup> /кг | Литература |
|---------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------|------------|
| Be                                                            | 573    | -1,2                                  | [12]       | NO <sub>2</sub>                                                   | 408   | 3,26 (г)                              | [1]        |
| Be                                                            | 1200   | -1,3                                  | [12]       | N <sub>2</sub> O                                                  | 285   | -0,429 (ж)                            | [1]        |
| BeCl <sub>2</sub>                                             | 298    | -0,332                                | [1]        | N <sub>2</sub> O                                                  | 289   | -0,429 (г)                            | [1]        |
| Be(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                             | 298    | -0,308 (р)                            | [1]        | N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     | 291   | -0,206 (ж)                            | [1]        |
| Be(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O          | 298    | -0,311                                | [4]        | N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                     | 257   | -0,276 (ТВ)                           | [1]        |
| BeO <sup>*1</sup>                                             | 298    | -0,476                                | [1]        | N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                     | 295,1 | -0,250                                | [1]        |
| Be(OH) <sub>2</sub>                                           | 290    | -0,537                                | [1]        | N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                     | 289   | -0,332 (ТВ)                           | [1]        |
| BeSO <sub>4</sub>                                             | 298    | -0,354                                | [1]        | $\beta$ -O <sub>2</sub>                                           | 33    | 118 (ТВ)                              | 24         |
| BeSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O                          | 290    | -0,51                                 | [7]        | $\gamma$ -O <sub>2</sub>                                          | 54,3  | 319 (ТВ)                              | [1]        |
| B <sup>*2</sup>                                               | 90     | -0,63                                 | [13]       | O <sub>2</sub>                                                    | 54,3  | 310 (ж)                               | [1]        |
| B <sup>*2</sup>                                               | 293    | -0,62                                 | [1; 13]    | O <sub>2</sub>                                                    | 70,8  | 271,4 (ж)                             | [1]        |
| B <sup>*2</sup>                                               | 373    | -0,73                                 | [14]       | O <sub>2</sub>                                                    | 90,1  | 240,6 (ж)                             | [1]        |
| B <sup>*2</sup>                                               | 503    | -0,76                                 | [14]       | O <sub>2</sub>                                                    | 293   | 107,8 (г)                             | [1]        |
| B <sup>*2</sup>                                               | 1373   | -0,71                                 | [14]       | O <sub>3</sub>                                                    | 90    | 0,14 <sup>*1</sup> (ж)                | [1]        |
| $\alpha$ -В (ромбоэдрический)                                 | 300    | -0,795                                | [15]       | O <sub>3</sub>                                                    | 90    | 0,14 (г)                              | [25]       |
| $\beta$ -В (ромбоэдрический)                                  | 300    | -0,78 (0,10)                          | [16]       | Ne                                                                | 293   | -0,33 (г)                             | [1]        |
| В (аморфный)                                                  | 300    | -0,3                                  | [15]       | Na <sup>*2</sup>                                                  | 78    | 0,582                                 | [9]        |
| В (аморфный)                                                  | 300    | -0,645                                | [16]       | Na <sup>*2</sup>                                                  | 298   | 0,610                                 | [9]        |
| BCl <sub>3</sub>                                              | 298    | -0,511 (ж)                            | [1]        | Na <sup>*2</sup>                                                  | 303   | 0,600                                 | [26]       |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | 298    | -0,56                                 | [1]        | Na <sup>*2</sup>                                                  | 523   | 0,620                                 | [26]       |
| С (алмаз)                                                     | 103    | -0,49                                 | [12]       | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>                     | 298   | -0,422                                | [1]        |
| С (алмаз)                                                     | 293    | -0,49                                 | [1]        | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O | 293   | -0,593                                | [27]       |
| С (алмаз)                                                     | 300    | -0,98                                 | [17]       | NaBr                                                              | 298   | -0,40                                 | [1]        |
| С (алмаз)                                                     | 473    | -0,50                                 | [14]       | NaBr·2H <sub>2</sub> O                                            | 291   | -0,420 (р)                            | [4]        |
| С (алмаз)                                                     | 673    | -0,51                                 | [14]       | NaBrO <sub>3</sub>                                                | 298   | -0,293                                | [1]        |
| С (алмаз)                                                     | 1173   | -0,54                                 | [14]       | NaC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>                    | 298   | -0,458                                | [1]        |
| С (алмаз)                                                     | 1473   | -0,56                                 | [14]       | NaC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O | 282   | -0,483                                | [4]        |
| С (графит) (п/к)                                              | 14     | -4,7                                  | [18]       | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                   | 298   | -0,39                                 | [1]        |
| С (графит) (п/к)                                              | 289    | -3,0                                  | [18]       | N <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O                | 290   | -0,58                                 | [7]        |
| С (м/к), $\chi_{\parallel}^{*3}$                              | 293    | -21                                   | [19]       | NaCl                                                              | 123   | -0,501 (ТВ)                           | [28]       |
| С (м/к), $\chi_{\perp}^{*3}$                                  | 293    | -0,4                                  | [19]       | NaCl                                                              | 298   | -0,518 (ТВ)                           | [1]        |
| CCl <sub>4</sub>                                              | 291    | -0,442                                | [4]        | NaCl                                                              | 635   | -0,499                                | [28]       |
| CH <sub>2</sub>                                               | 293    | -0,4936                               | [20]       | NaCl                                                              | 1206  | -0,508                                | [28]       |
| CN <sub>2</sub>                                               | 298    | -0,432 (ж)                            | [21]       | NaClO <sub>3</sub>                                                | 298   | -0,326                                | [1]        |
| CNCl                                                          | 298    | -0,527                                | [1]        | Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                    | 298   | -0,21                                 | [1]        |
| CO <sub>2</sub>                                               | 298    | -0,454                                | [1]        | NaF                                                               | 298   | -0,383 (ТВ)                           | [1]        |
| CO                                                            | 298    | -0,35                                 | [1]        | NaHCO <sub>3</sub>                                                | 293   | -0,21                                 | [29]       |
| COS                                                           | 298    | -0,539                                | [1]        | NaHPO <sub>3</sub>                                                | 293   | -0,457                                | [30]       |
| COCl <sub>2</sub>                                             | 298    | -0,485                                | [1]        | NaHPO <sub>4</sub>                                                | 293   | -0,399                                | [30]       |
| CS <sub>2</sub>                                               | 293    | -0,554 (ж)                            | [22]       | NaHPO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O                              | 296   | -0,438 (ТВ)                           | [4]        |
| N <sub>2</sub>                                                | 88     | -0,507                                | [23]       | NaH <sub>2</sub> PO <sub>2</sub>                                  | 293   | -0,381                                | [30]       |
| N <sub>2</sub>                                                | 293    | -0,427                                | [1]        | NaI                                                               | 298   | -0,380                                | [1]        |
| NH <sub>3</sub>                                               | 298    | -1,06 (г)                             | [1]        | NaI·2H <sub>2</sub> O                                             | 300   | -0,405 (р)                            | [4]        |
| NH <sub>3</sub> Br                                            | 298    | -0,484 (ТВ)                           | [1]        | NaIO <sub>3</sub>                                                 | 298   | -0,268                                | [1]        |
| NH <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>  | 298    | -0,533                                | [1]        | NaNO <sub>2</sub>                                                 | 298   | -0,210                                | [1]        |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>               | 298    | -0,545                                | [1]        | NaNO <sub>3</sub>                                                 | 298   | -0,301                                | [1]        |
| NH <sub>4</sub> Cl                                            | 298    | -0,686 (ТВ)                           | [1]        | Na <sub>2</sub> O                                                 | 298   | -0,319                                | [1]        |
| NH <sub>4</sub> ClO <sub>3</sub>                              | 298    | -0,415                                | [1]        | Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                                    | 298   | -0,36                                 | [1]        |
| NH <sub>4</sub> F                                             | 298    | -0,62 (ТВ)                            | [1]        | NaOH                                                              | 290   | -0,59                                 | [7]        |
| NH <sub>4</sub> I                                             | 298    | -0,455 (ТВ)                           | [1]        | NaPO <sub>3</sub>                                                 | 298   | -0,417                                | [1]        |
| NH <sub>4</sub> IO <sub>3</sub>                               | 298    | -0,323                                | [1]        | Na <sub>2</sub> S                                                 | 298   | -0,50                                 | [1]        |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                               | 298    | -0,421 (ТВ)                           | [1]        | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub>                                    | 298   | -0,48                                 | [1]        |
| NH <sub>4</sub> OH                                            | 298    | -0,90                                 | [1]        | Na <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                    | 298   | -0,48                                 | [1]        |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>               | 298    | -0,51                                 | [1]        | Na <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                                    | 298   | -0,48                                 | [1]        |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> | 294    | -0,440                                | [4]        | Na <sub>2</sub> S <sub>5</sub>                                    | 298   | -0,48                                 | [1]        |
| NH <sub>4</sub> SCN                                           | 298    | -0,632                                | [1]        | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                   | 298   | -0,37                                 | [1]        |
| NO                                                            | 63—90  | 0,66 (ТВ)                             | [1]        | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O               | 298   | -0,571                                | [1]        |
| NO                                                            | 117,64 | 3,81 (ж)                              | [1]        | Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O                | 293   | -0,462                                | [30]       |
| NO                                                            | 146,9  | 77,45 (г)                             | [1]        | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 298   | -0,246                                | [1]        |
| NO                                                            | 298    | 48,7 (г)                              | [1]        | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O  | 290   | -0,368 (ТВ)                           | [4]        |
|                                                               |        |                                       |            | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                     | 298   | -0,200                                | [10]       |
|                                                               |        |                                       |            | Na <sub>2</sub> Se                                                | 298   | -0,48                                 | [31]       |

\*1 Значение  $\chi$  не зависит от температуры. \*2 См. рис. 26.2.  
 \*3 См. рис. 26.3.

\*1 При  $T < 90$  К значение  $\chi$  не зависит от  $T$  [1]  
 \*2 См. рис. 26.4, 26.5.

| Вещество                                                                           | T, K         | $\chi$ , $10^{-9}$ , м <sup>2</sup> /кг | Литература |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|------------|
| Na <sub>2</sub> Se <sub>2</sub>                                                    | 298          | -0,392                                  | [31]       |
| Na <sub>2</sub> Te                                                                 | 298          | -0,432                                  | [31]       |
| Na <sub>2</sub> Te <sub>2</sub>                                                    | 298          | -0,349                                  | [31]       |
| Mg* <sup>1</sup> (п/к)                                                             | 1,2          | 0,25                                    | [32]       |
| Mg* <sup>1</sup> (п/к)                                                             | 293          | 0,46                                    | [33]       |
| Mg (м/к), $\chi_{\parallel}$                                                       | 293          | 0,46                                    | [33]       |
| Mg (м/к), $\chi_{\perp}$                                                           | 293          | 0,46                                    | [33]       |
| MgBr <sub>2</sub>                                                                  | 298          | -0,39                                   | [1]        |
| Mg (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O | 298          | -0,541                                  | [1]        |
| MgCO <sub>3</sub>                                                                  | 298          | -0,384                                  | [1]        |
| MgCO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O                                               | 293          | -0,525                                  | [1]        |
| MgCl <sub>2</sub>                                                                  | 298          | -0,498                                  | [1]        |
| MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                                               | 291          | -0,57                                   | [7]        |
| MgF <sub>2</sub>                                                                   | 298          | -0,364                                  | [1]        |
| MgI <sub>2</sub>                                                                   | 298          | -0,399                                  | [1]        |
| Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                               | 291          | -0,287 (p)                              | [4]        |
| MgO <sub>2</sub>                                                                   | 290          | -0,25                                   | [1]        |
| Mg(OH) <sub>2</sub>                                                                | 288          | -0,378                                  | [1]        |
| MgSO <sub>4</sub>                                                                  | 298          | -0,415                                  | [1]        |
| MgSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O                                                | 298          | -0,441                                  | [1]        |
| MgSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O                                               | 298          | -0,518                                  | [1]        |
| MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                                               | 298          | -0,551                                  | [1]        |
| Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O                 | 298          | -0,499                                  | [1]        |
| Al* <sup>2</sup>                                                                   | 298          | 0,61                                    | [1]        |
| Al* <sup>2</sup>                                                                   | $T > T_{пл}$ | 0,44 (ж)                                | [1]        |
| AlBr <sub>3</sub>                                                                  | 292          | -0,32                                   | [7]        |
| AlCl <sub>3</sub>                                                                  | 292          | -0,60                                   | [7]        |
| AlF <sub>3</sub>                                                                   | 302          | -0,16                                   | [1]        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * <sup>3</sup>                                      | 298          | -0,36                                   | [1]        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                  | 293          | -0,337                                  | [34]       |
| Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                                    | 298          | -0,27                                   | [1]        |
| Si* <sup>4</sup>                                                                   | 300          | -0,228                                  | [17]       |
| SiBr <sub>4</sub>                                                                  | 298          | -0,370                                  | [1]        |
| SiC                                                                                | 300          | -0,265                                  | [35]       |
| SiCl <sub>4</sub>                                                                  | 298          | -0,520                                  | [1]        |
| SiO <sub>2</sub>                                                                   | 293          | -0,493                                  | [1]        |
| Si(OH) <sub>4</sub>                                                                | 293          | -0,443                                  | [1]        |
| SiO(OH) <sub>2</sub>                                                               | 293          | -0,427                                  | [36]       |
| Si <sub>2</sub> O(OH) <sub>6</sub>                                                 | 293          | -0,429                                  | [36]       |
| P (черный)                                                                         | 293          | -0,86                                   | [1]        |
| P (белый)                                                                          | 103          | -0,90                                   | [2]        |
| P (белый)                                                                          | 317          | -0,90                                   | [2]        |
| P (красный)                                                                        | 293          | -0,67                                   | [14]       |
| P                                                                                  | 318          | -0,90 (ж)                               | [14]       |
| P                                                                                  | 393          | -0,90 (ж)                               | [14]       |
| PCl <sub>3</sub>                                                                   | 292          | -0,463                                  | [1]        |
| PCl <sub>5</sub>                                                                   | 298          | -0,490                                  | [1]        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                                      | 291          | -0,46                                   | [7]        |
| POCl <sub>3</sub>                                                                  | 286          | -0,449                                  | [4]        |
| $\alpha$ -S                                                                        | 293          | -0,487                                  | [1]        |
| (ромбическая)                                                                      |              |                                         |            |
| $\beta$ -S                                                                         | 293          | -0,464                                  | [1]        |
| (моноклинная)                                                                      |              |                                         |            |
| S* <sup>5</sup>                                                                    | 293          | 0,259 ÷ 0,374                           | [37]       |
| S                                                                                  | $T > T_{пл}$ | -0,480 (ж)                              | [1]        |
| S                                                                                  | 828          | 22 (г)                                  | [1]        |

| Вещество                                      | T, K  | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>2</sup> /кг | Литература |
|-----------------------------------------------|-------|---------------------------------------|------------|
| S                                             | 1023  | 14,5 (г)                              | [1]        |
| S (м/к), $\chi_a$                             | 298   | -0,500                                | [38]       |
| S (м/к), $\chi_b$                             | 298   | -0,478                                | [38]       |
| S (м/к), $\chi_c$                             | 298   | -0,474                                | [38]       |
| S <sub>2</sub> C                              | 298   | -0,554 (ж)                            | [10]       |
| SCl <sub>2</sub>                              | 298   | -0,480                                | [1]        |
| SCl <sub>3</sub>                              | 298   | -0,357                                | [1]        |
| S <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub>                | 298   | -0,365                                | [1]        |
| SF <sub>6</sub>                               | 293   | -0,301                                | [1]        |
| SH <sub>2</sub>                               | 298   | -0,748                                | [10]       |
| SI                                            | 298   | -0,332                                | [1]        |
| SI <sub>2</sub>                               | 298   | -0,184                                | [10]       |
| S <sub>4</sub> N <sub>4</sub>                 | 298   | -0,553                                | [10]       |
| SO <sub>2</sub>                               | 298   | -0,284                                | [1]        |
| SOCl <sub>2</sub>                             | 298   | -0,378                                | [10]       |
| SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>               | 283   | -0,402                                | [10]       |
| SOC                                           | 298   | -0,539                                | [10]       |
| Cl                                            | 213   | -0,57 (ж)                             | [20]       |
| Cl                                            | 298   | -0,57                                 | [1]        |
| ClF <sub>3</sub>                              | 298   | -0,287                                | [1]        |
| ClH                                           | 195   | -0,647                                | [10]       |
| ClH                                           | 273   | -0,620 (ж)                            | [10]       |
| Ar                                            | 90    | -0,49                                 | [2]        |
| Ar                                            | 293   | -0,49                                 | [1]        |
| K* <sup>1</sup>                               | 293   | 0,532                                 | [1]        |
| K* <sup>1</sup>                               | 303   | 0,460                                 | [26]       |
| K* <sup>1</sup>                               | 523   | 0,467 (ж)                             | [26]       |
| KBr                                           | 298   | -0,413                                | [1]        |
| KBrO <sub>3</sub>                             | 298   | -0,315                                | [1]        |
| KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> | 298   | -0,458                                | [1]        |
| KCN                                           | 298   | -0,568                                | [1]        |
| KCNO                                          | 293   | -0,465                                | [39]       |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                | 298   | -0,427                                | [1]        |
| KCl                                           | 298   | -0,523                                | [1]        |
| KClO <sub>3</sub>                             | 298   | -0,349                                | [1]        |
| KClO <sub>4</sub>                             | 298   | -0,342                                | [10]       |
| K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>               | 298   | -0,020                                | [1]        |
| K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 293   | -0,100                                | [1]        |
| KF                                            | 298   | -0,406                                | [1]        |
| K <sub>4</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>            | 298   | -0,353                                | [1]        |
| KHF <sub>2</sub>                              | 293   | -0,428                                | [40]       |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>               | 290   | -0,435                                | [4]        |
| KHSO <sub>4</sub>                             | 298   | -0,36                                 | [1]        |
| KI                                            | 298   | -0,384                                | [1]        |
| KIO <sub>3</sub>                              | 298   | -0,295                                | [1]        |
| KIO <sub>4</sub>                              | 295   | -0,292                                | [4]        |
| KMnO <sub>4</sub>                             | 298   | -0,127                                | [1]        |
| KNO <sub>3</sub>                              | 293   | -0,333                                | [1]        |
| KNO <sub>2</sub>                              | 298   | -0,274                                | [1]        |
| KOH                                           | 298,5 | -0,390                                | [1]        |
| K <sub>2</sub> S                              | 298   | -0,54                                 | [1]        |
| K <sub>2</sub> S <sub>2</sub>                 | 298   | -0,50                                 | [1]        |
| K <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                 | 298   | -0,46                                 | [1]        |
| K <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                 | 298   | -0,43                                 | [1]        |
| K <sub>2</sub> S <sub>5</sub>                 | 298   | -0,41                                 | [1]        |
| KSCN                                          | 298   | -0,49                                 | [1]        |
| K <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>                | 298   | -0,404                                | [1]        |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                | 289   | -0,385                                | [1]        |
| K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 299   | -0,393                                | [4]        |
| K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 295   | -0,389                                | [4]        |
| K <sub>2</sub> S <sub>4</sub> O <sub>6</sub>  | 293   | -0,412                                | [30]       |

\*<sup>1</sup> См. рис. 26.6.\*<sup>2</sup> См. рис. 26.7.\*<sup>3</sup>  $\chi$  зависит от способа получения вещества [10].\*<sup>4</sup> Зависимость  $\chi$  от концентрации электронов и дырок см. в[98]. \*<sup>5</sup> Значение  $\chi$  зависит от способа изготовления и термообработки вещества [37].\*<sup>1</sup> См. рис. 26.4, 26.5; при уменьшении температуры от 298 К до 78 К  $\chi$  уменьшается на 0,2% [26].

| Вещество                                                       | T, К   | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литера-тура |
|----------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------|-------------|
| K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                   | 295    | —0,398                                | [4]         |
| K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>                   | 293    | —0,371                                | [30]        |
| K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                | 299    | —0,383 (p)                            | [4]         |
| Ca <sup>*1</sup> (п/к)                                         | 291    | 1,1                                   | [12]        |
| Ca <sup>*2</sup> (м/к)                                         | 293    | 1,05                                  | [33]        |
| CaBr <sub>2</sub>                                              | 298    | —0,369                                | [1]         |
| CaBr <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O                           | 298    | —0,453                                | [1]         |
| Ca(BrO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                             | 298    | —0,287                                | [1]         |
| Ca(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> | 283    | —0,446                                | [1]         |
| CaCO <sub>3</sub>                                              | 298    | —0,382                                | [1]         |
| CaCl <sub>2</sub>                                              | 290    | —0,49                                 | [1]         |
| CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                           | 288    | —0,462                                | [4]         |
| CaF <sub>2</sub>                                               | 293    | —0,360                                | [1]         |
| CaI <sub>2</sub>                                               | 298    | —0,371                                | [1]         |
| Ca(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                              | 298    | —0,260                                | [1]         |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                              | 298    | —0,239 (p)                            | [10]        |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O           | 298    | —0,194                                | [1]         |
| CaO                                                            | 289    | —0,27                                 | [1]         |
| CaO <sub>2</sub>                                               | 298    | —0,330                                | [1]         |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                                            | 298    | —0,297                                | [1]         |
| CaSO <sub>4</sub>                                              | 293    | —0,364                                | [1]         |
| CaSO <sub>4</sub> ·(1/2) H <sub>2</sub> O                      | 298    | —0,384                                | [10]        |
| CaSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O                            | 293    | —0,384                                | [30]        |
| CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                           | 298    | —0,43                                 | [1]         |
| Sc <sup>*3</sup>                                               | 90     | 8,2                                   | [1]         |
| Sc <sup>*3</sup>                                               | 292    | 7,0                                   | [41]        |
| Sc <sup>*3</sup>                                               | 293    | 6,45 (0,05)                           | [42]        |
| Sc <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>  | 293    | —0,25                                 | [29]        |
| ScH <sub>0,16</sub>                                            | 293    | 6,38                                  | [42]        |
| ScH <sub>0,26</sub>                                            | 293    | 6,20                                  | [42]        |
| ScH <sub>0,36</sub>                                            | 293    | 3,61                                  | [42]        |
| Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | 293    | —0,018                                | [29]        |
| Sc <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                | 293    | —0,33                                 | [43]        |
| Ti <sup>*4</sup> (п/к)                                         | 90     | 3,13                                  | [1]         |
| Ti <sup>*4</sup> (п/к)                                         | 293    | 3,19                                  | [1]         |
| Ti <sup>*4</sup> (п/к)                                         | 293    | 3,36                                  | [44]        |
| Ti (м/к), $\chi_{  }$                                          | 298    | 3,35                                  | [45]        |
| Ti (м/к), $\chi_{  }$                                          | 573    | 3,65                                  | [45]        |
| Ti (м/к), $\chi_{\perp}$                                       | 298    | 3,07                                  | [45]        |
| Ti (м/к), $\chi_{\perp}$                                       | 573    | 3,38                                  | [45]        |
| TiC <sup>*5</sup>                                              | 293    | 0,6                                   | [46]        |
| TiCl <sub>4</sub>                                              | 293    | —0,213                                | [47]        |
| TiI <sub>2</sub>                                               | 288    | 5,93                                  | [1]         |
| TiN <sup>*5</sup>                                              | 293    | 1,00                                  | [48]        |
| TiO <sup>*6</sup>                                              | 79     | 1,38                                  | [49]        |
| TiO <sub>2</sub>                                               | 293    | 0,08                                  | [50]        |
| Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub>                                 | 293    | 8,1                                   | [51]        |
| TiO <sub>3</sub>                                               | 248    | 1,38                                  | [1]         |
| TiP                                                            | 297    | 0,25                                  | [52]        |
| TiS                                                            | 298    | 5,40                                  | [1]         |
| Ti <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                 | 293    | 0,91                                  | [51]        |
| TiS <sub>2</sub>                                               | 296    | 0,408                                 | [53]        |
| TiS <sub>3</sub>                                               | 90—573 | —0,09                                 | [54]        |
| TiSi                                                           | 293    | 0,20                                  | [55]        |
| TiSi <sub>2</sub>                                              | 293    | 1,2                                   | [55]        |
| Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>                                | 293    | 2,54                                  | [56]        |

| Вещество                                         | T, К         | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литера-тура |
|--------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------|
| V <sup>*1</sup>                                  | 293          | 5,30                                  | [57]        |
| VCl <sub>4</sub> NO                              | 298          | 5,0                                   | [58]        |
| V <sub>2</sub> Cl <sub>7</sub> NO                | 298,5        | 10,504                                | [59]        |
| V <sub>3</sub> Cl <sub>8</sub> (NO) <sub>5</sub> | 298,5        | 10,998                                | [59]        |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>*2</sup>      | 293          | 1,1                                   | [60]        |
| VOCl <sub>3</sub>                                | 293          | —0,069                                | [61]        |
| VP                                               | 297          | 0,032                                 | [52]        |
| V <sub>3</sub> Si                                | 293          | 4,4                                   | [62]        |
| V <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>                   | 293          | 3,0                                   | [63]        |
| VS <sub>2</sub>                                  | 293          | 1,50                                  | [56]        |
| VSi <sub>2</sub>                                 | 293          | 1,32                                  | [64]        |
| Cr(CO) <sub>6</sub>                              | 298          | 0,050                                 | [1]         |
| Cr(C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>2</sub>  | 298          | —0,724                                | [1]         |
| CrO <sub>3</sub>                                 | 293          | 0,40                                  | [65]        |
| CrO <sub>2</sub> Cl                              | 220,4        | —0,094                                | [66]        |
| CrO <sub>2</sub> Cl                              | 249,3        | —0,040                                | [66]        |
| CrO <sub>2</sub> Cl                              | 296,2        | 0,017                                 | [66]        |
| CrP                                              | 298          | 3,80                                  | [67]        |
| Cr <sub>3</sub> P                                | 4,2          | 4,0                                   | [68]        |
| Cr <sub>3</sub> Si                               | 293          | 2,1                                   | [70]        |
| Cr <sub>3</sub> Si                               | 293          | 2,3                                   | [69]        |
| Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>                  | 293          | 3,0                                   | [69]        |
| Cr <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>                  | 293          | 3,06                                  | [63]        |
| CrSi                                             | 293          | 5,1                                   | [69]        |
| CrSi <sub>2</sub>                                | 293          | —0,38÷—0,94                           | [71]        |
| Mn <sub>n</sub> Si <sub>2n-m</sub>               | 293          | —0,4                                  | [72]        |
| FeAs <sub>2</sub>                                | 90—670       | 2,1834                                | [73]        |
| FeB <sub>2</sub> (порошок)                       | 100—300      | 0,74                                  | [74]        |
| FeB <sub>2</sub> (м/к)                           | 115—300      | —0,138                                | [74]        |
| Fe(CN) <sub>6</sub> H <sub>4</sub>               | 298          | —0,329                                | [1]         |
| Fe(CO) <sub>4</sub>                              | 298          | —0,019                                | [1]         |
| Fe(CO) <sub>5</sub>                              | 298          | —0,480                                | [1]         |
| FeS <sub>2</sub>                                 | 295          | 0,084                                 | [75]        |
| FeSi                                             | 293          | 7,9                                   | [76]        |
| CoP                                              | 298          | 0,6                                   | [67]        |
| Co <sub>2</sub> P                                | 298          | 3,54                                  | [67]        |
| CoPS                                             | 298          | 0,17                                  | [77]        |
| CoPSe                                            | 298          | 0,089                                 | [77]        |
| Co <sub>3</sub> S <sub>4</sub>                   | 293          | 3,4                                   | [78]        |
| Co <sub>2</sub> Si                               | 293          | 6,4                                   | [79]        |
| CoSi                                             | 293          | —0,3                                  | [76]        |
| CoSi                                             | 293          | —0,44                                 | [80]        |
| CoSi <sub>2</sub>                                | 293          | 0,4                                   | [76]        |
| NiAs                                             | 298          | 0,322                                 | [1]         |
| $\beta$ -NiAs <sub>2</sub>                       | 90—373       | 0,2309                                | [73]        |
| Ni <sub>3</sub> P                                | 4,2          | 8,8                                   | [68]        |
| Ni <sub>3</sub> S <sub>2</sub>                   | 293          | 4,3                                   | [81]        |
| Ni <sub>2</sub> Si                               | 293          | 0,3                                   | [79]        |
| NiSi                                             | 293          | —0,3                                  | [76]        |
| NiSi                                             | 293          | —0,08                                 | [71]        |
| Ni <sub>1,03</sub> Si <sub>1,93</sub>            | 293          | 0,19                                  | [82]        |
| Cu <sup>*4</sup>                                 | 296          | —0,086                                | [1]         |
| Cu <sup>*4</sup>                                 | $T > T_{пл}$ | —0,097 (ж)                            | [1]         |
| CuBr                                             | 298          | —0,345                                | [1]         |
| CuCN                                             | 298          | —0,267                                | [1]         |
| CuCl                                             | 298          | —0,400                                | [1]         |
| CuI                                              | 298          | —0,330                                | [1]         |
| Cu <sub>2</sub> O                                | 298          | —0,216                                | [83]        |
| Cu <sub>3</sub> P                                | 298          | —0,149                                | [1]         |
| Cu <sub>3</sub> P <sub>2</sub>                   | 291          | —0,23                                 | [7]         |

\*1 См. рис. 26.6. \*2  $\chi$  изотропна.

\*3 См. рис. 26.8.

\*4 См. рис. 26.9.

\*5  $\chi$  почти не зависит от T [48].\*6  $\chi$  не зависит от T между 79 и 373 К [49].\*1 См. рис. 26.10; при T < 770 К  $\chi$  не зависит от T [10].\*2 Значение  $\chi$  не зависит от T [60].\*3 Значение  $\chi$  не зависит от T [72].

\*4 См. рис. 26.11.

| Вещество                                                                          | T, К                | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литера-тура |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------|
| CuP <sub>2</sub>                                                                  | 298                 | -0,28                                 | [1]         |
| CuS                                                                               | 293                 | 0,05                                  | [84]        |
| Cu <sub>2</sub> S                                                                 | 77—1073             | 0,30                                  | [84]        |
| Cu <sub>2</sub> S <sub>2</sub>                                                    | 300                 | 0,15                                  | [85]        |
| CuSCN                                                                             | 298                 | -0,398                                | [1]         |
| CuSe                                                                              | 293                 | -0,14                                 | [86]        |
| Cu <sub>2</sub> Se                                                                | 77—1073             | 0,25                                  | [84]        |
| CuSe <sub>2</sub>                                                                 | 298                 | 0,42                                  | [87]        |
| CuTe <sub>2</sub>                                                                 | 298                 | -0,40                                 | [87]        |
| Zn (п/к)                                                                          | 298                 | -0,175                                | [1]         |
| Zn (п/к)                                                                          | $T > T_{\text{пл}}$ | -0,12 (ж)                             | [1]         |
| Zn* <sup>1</sup> (м/к), $\chi_{\parallel}$                                        | 293                 | -0,190                                | [88]        |
| Zn* <sup>1</sup> (м/к), $\chi_{\perp}$                                            | 293                 | -0,145                                | [88]        |
| Zn <sub>3</sub> As <sub>2</sub>                                                   | 300                 | -0,434                                | [89]        |
| ZnBr <sub>2</sub>                                                                 | 292                 | -0,40                                 | [7]         |
| Zn(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O | 298                 | -0,46                                 | [1]         |
| Zn(CN) <sub>2</sub>                                                               | 298                 | -0,392                                | [1]         |
| ZnCO <sub>3</sub>                                                                 | 298                 | -0,271                                | [1]         |
| ZnCl <sub>2</sub>                                                                 | 296                 | -0,477                                | [1]         |
| ZnF <sub>2</sub>                                                                  | 299,6               | -0,370                                | [1]         |
| ZnI <sub>2</sub>                                                                  | 298                 | -0,307                                | [1]         |
| Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                                 | 298                 | -0,333                                | [1]         |
| ZnO                                                                               | 298                 | -0,565                                | [1]         |
| Zn(OH) <sub>2</sub>                                                               | 298                 | -0,67                                 | [1]         |
| Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>                                                    | 300                 | -0,465                                | [89]        |
| ZnS                                                                               | 77                  | -0,36                                 | [10]        |
| ZnS                                                                               | 298                 | -0,26                                 | [1]         |
| Zn <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>                                                   | 300                 | -0,466                                | [89]        |
| ZnSO <sub>4</sub>                                                                 | 298                 | -0,34                                 | [10]        |
| ZnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O                                               | 298                 | -0,351                                | [1]         |
| ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                                              | 298                 | -0,497                                | [1]         |
| Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                                   | 298                 | -0,365                                | [1]         |
| Ga* <sup>2</sup> (п/к)                                                            | 80                  | -0,35 (ТВ)                            | [1]         |
| Ga* <sup>2</sup> (п/к)                                                            | 290                 | -0,31 (ТВ)                            | [1]         |
| Ga* <sup>2</sup> (п/к)                                                            | 303                 | 0,036 (ж)                             | [1]         |
| Ga (м/к), $\chi_a$                                                                | 298                 | -0,12                                 | [90]        |
| Ga (м/к), $\chi_b$                                                                | 298                 | -0,42                                 | [90]        |
| Ga (м/к), $\chi_c$                                                                | 298                 | -0,23                                 | [90]        |
| GaAs                                                                              | 300                 | -0,230                                | [17]        |
| GaCl <sub>2</sub>                                                                 | 293                 | -0,45                                 | [1]         |
| CaI <sub>2</sub>                                                                  | 298                 | -0,46                                 | [1]         |
| CaN                                                                               | 293                 | -0,332                                | [6]         |
| Ca <sub>2</sub> O                                                                 | 298                 | -0,219                                | [1]         |
| CaP                                                                               | 300                 | -0,298                                | [17]        |
| Ca <sub>2</sub> S                                                                 | 298                 | -0,210                                | [1]         |
| CaS                                                                               | 295                 | -1,715                                | [91]        |
| Ca <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                                    | 298                 | -0,34                                 | [1]         |
| CaSb                                                                              | 293                 | -0,201                                | [92]        |
| CaSe                                                                              | 293                 | -0,20                                 | [93]        |
| Ge* <sup>3</sup>                                                                  | 4,2                 | -0,1102                               | [94]        |
| Ge* <sup>3</sup>                                                                  | 77,3                | -0,1095                               | [94]        |
| Ge* <sup>3</sup>                                                                  | 293                 | -0,1059                               | [1]         |
| GeCl <sub>4</sub>                                                                 | 298                 | -0,34                                 | [1]         |
| GeF <sub>4</sub>                                                                  | 298                 | -0,34                                 | [10]        |
| GeI <sub>4</sub>                                                                  | 298                 | -0,30                                 | [1]         |
| GeO                                                                               | 298                 | -0,325                                | [1]         |
| GeO <sub>2</sub>                                                                  | 298                 | -0,328                                | [1]         |
| GeS                                                                               | 298                 | -0,391                                | [1]         |
| GeS <sub>2</sub>                                                                  | 298                 | -0,390                                | [1]         |
| As (п/к)                                                                          | 84                  | 0,146                                 | [99]        |

| Вещество                                   | T, К                 | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литера-тура |
|--------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|-------------|
| As (п/к)                                   | 181                  | 0,092                                 | [99]        |
| As (п/к)                                   | 298                  | 0,016                                 | [99]        |
| As (п/к)                                   | 461                  | -0,087                                | [99]        |
| $\beta$ -As аморфный                       | 90                   | -0,30                                 | [1]         |
| $\beta$ -As аморфный                       | 293                  | -0,316                                | [1]         |
| $\gamma$ -As аморфный                      | 293                  | -0,307                                | [1]         |
| As (м/к) $\chi_{\parallel}$ * <sup>1</sup> | 82                   | 1,005                                 | [99]        |
| As (м/к) $\chi_{\parallel}$ * <sup>1</sup> | 292                  | 0,578                                 | [99]        |
| As (м/к) $\chi_{\parallel}$ * <sup>1</sup> | 531                  | 0,273                                 | [99]        |
| As (м/к) $\chi_{\perp}$                    | 82                   | -0,238                                | [99]        |
| As (м/к) $\chi_{\perp}$                    | 292                  | -0,279                                | [99]        |
| As (м/к) $\chi_{\perp}$                    | 510                  | -0,302                                | [99]        |
| AsBr <sub>3</sub>                          | 298                  | -0,337                                | [1]         |
| AsCl <sub>3</sub>                          | 298                  | -0,441                                | [10]        |
| AsI <sub>3</sub>                           | 298                  | -0,312                                | [1]         |
| As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | 298                  | -0,208                                | [10]        |
| AsOCl                                      | 298                  | -0,240                                | [10]        |
| As <sub>2</sub> S <sub>2</sub>             | 298                  | -0,327                                | [10]        |
| As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>             | 291                  | -0,03                                 | [7]         |
| Se* <sup>2</sup>                           | 298                  | -0,32                                 | [1]         |
| (гексагональный) Se* <sup>2</sup>          | 1,6—77               | 0,272                                 | [100]       |
| (гексагональный) Se* <sup>2</sup>          | 293                  | 0,188—0,271                           | [37]        |
| (гексагональный) Se* <sup>2</sup>          | 900                  | -0,304 (ж)                            | [1]         |
| Se (аморфный)                              | 300                  | -0,279                                | [101]       |
| Se <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>            | 298                  | -0,356                                | [1]         |
| Se <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>            | 298                  | -0,414                                | [1]         |
| SeF <sub>6</sub>                           | 298                  | -0,264                                | [1]         |
| SeO <sub>2</sub>                           | 298                  | -0,245                                | [1]         |
| SeO <sub>3</sub> H <sub>2</sub>            | 298                  | -0,352                                | [10]        |
| SeO <sub>4</sub> H <sub>2</sub>            | 298                  | -0,353                                | [10]        |
| SeOCl <sub>2</sub>                         | 298                  | -0,293                                | [10]        |
| Br <sub>2</sub>                            | 103                  | -0,40 (ТВ)                            | [12]        |
| Br <sub>2</sub>                            | 265                  | -0,40 (ТВ)                            | [12]        |
| Br <sub>2</sub>                            | 266                  | -0,40 (ж)                             | [12]        |
| Br <sub>2</sub>                            | 291                  | -0,40 (ж)                             | [12]        |
| Br <sub>2</sub>                            | $T > T_{\text{пл}}$  | -0,353 (ж)                            | [1]         |
| Br <sub>2</sub>                            | $T > T_{\text{исп}}$ | -0,46 (г)                             | [1]         |
| BrF <sub>3</sub>                           | 298                  | -0,248                                | [1]         |
| BrF <sub>5</sub>                           | 298                  | -0,258                                | [1]         |
| Kr                                         | 291                  | -0,38 (ж)                             | [102]       |
| Kr                                         | $T > T_{\text{исп}}$ | -0,344 (г)                            | [1]         |
| Rb* <sup>3</sup>                           | 298                  | 0,21                                  | [9]         |
| Rb* <sup>3</sup>                           | 303                  | 0,198                                 | [1]         |
| RbBr                                       | 298                  | -0,341                                | [1]         |
| Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>            | 298                  | -0,326                                | [1]         |
| RbCl                                       | 298                  | -0,380                                | [1]         |
| RbF                                        | 298                  | -0,305                                | [1]         |
| RbI                                        | 298                  | -0,340                                | [1]         |
| RbNO <sub>3</sub>                          | 293                  | -0,281                                | [1]         |
| Rb <sub>2</sub> S                          | 298                  | -0,394                                | [1]         |
| Rb <sub>2</sub> S <sub>2</sub>             | 298                  | -0,383                                | [1]         |
| Rb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>             | 298                  | -0,374                                | [10]        |

\*<sup>1</sup> См. рис. 26.12.

\*\* См. рис. 26.13.

\*\*\* См. рис. 26.14—26.16; зависимость  $\chi$  от концентраций электронов, дырок — см. [95—98].\*<sup>1</sup> См. рис. 26.17.\*<sup>2</sup> См. рис. 26.18.\*<sup>3</sup> См. рис. 26.4; при уменьшении температуры от 298 до 78 К значение  $\chi$  увеличивается на 2,5% [9].

| Вещество                                                       | T, К   | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литература | Вещество                                                            | T, К              | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литература |
|----------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|------------|
| Rb <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                                 | 298    | -0,371                                | [10]       | MoO <sub>2</sub>                                                    | 289               | 0,32                                  | [1]        |
| Rb <sub>2</sub> S <sub>5</sub>                                 | 298    | -0,368                                | [10]       | MoO <sub>3</sub>                                                    | 293               | 0,02                                  | [1]        |
| Rb <sub>2</sub> S <sub>6</sub>                                 | 298    | -0,363                                | [10]       | Mo <sub>2</sub> C <sub>3</sub>                                      | 298               | -0,175                                | [1]        |
| Rb <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>                                | 293    | -0,331                                | [1]        | Mo <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                      | 293               | 0,23                                  | [110]      |
| Sr                                                             | 295    | 1,05                                  | [1]        | Mo <sub>3</sub> O <sub>8</sub>                                      | 298               | 0,101                                 | [1]        |
| Sr                                                             | 533    | 0,73                                  | [103]      | MoS <sub>2</sub>                                                    | 289               | -0,48                                 | [10]       |
| SrBr <sub>2</sub>                                              | 298    | -0,35                                 | [1]        | MoS <sub>3</sub>                                                    | 289               | -0,33                                 | [1]        |
| SrBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                           | 298    | -0,45                                 | [1]        | MoTe <sub>2</sub>                                                   | 293               | -0,342                                | [111]      |
| Sr(BrO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                             | 298    | -0,272                                | [1]        | Tc                                                                  | 78                | 2,9                                   | [1]        |
| Sr(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> | 284    | -0,385                                | [1]        | Tc                                                                  | 298               | 2,7                                   | [1]        |
| SrCO <sub>3</sub>                                              | 298    | -0,32                                 | [1]        | Tc                                                                  | 402               | 2,5                                   | [1]        |
| SrCl <sub>2</sub>                                              | 293    | -0,40                                 | [1]        | TcO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                 | 78                | 3,4                                   | [112]      |
| SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O                           | 298    | -0,544                                | [1]        | TcO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                 | 300               | 1,2                                   | [1]        |
| Sr(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                             | 298    | -0,287                                | [1]        | TcO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                 | 398               | 1,34                                  | [112]      |
| SrCrO <sub>4</sub>                                             | 298    | -0,025                                | [1]        | Tc <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                                      | 298               | -0,129                                | [1]        |
| SrF <sub>2</sub>                                               | 293    | -0,296                                | [1]        | TcO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> )                                 | 78                | 0,077                                 | [10]       |
| SrI <sub>2</sub>                                               | 298    | -0,328                                | [1]        | TcO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> )                                 | 298               | 0,050                                 | [10]       |
| Sr(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                              | 298    | -0,247                                | [1]        | Ru <sup>*1</sup>                                                    | 18                | 0,43                                  | [12]       |
| Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                              | 298    | -0,270                                | [1]        | Ru <sup>*1</sup>                                                    | 293               | 0,34                                  | [44]       |
| Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O           | 298    | -0,374                                | [1]        | Ru <sup>*1</sup>                                                    | 723               | 0,496                                 | [1]        |
| SrO                                                            | 298    | -0,34                                 | [1]        | RuAs <sub>2</sub>                                                   | 90—770            | -0,1681                               | [73]       |
| SrO <sub>2</sub>                                               | 298    | -0,27                                 | [1]        | RuO <sub>2</sub>                                                    | 297               | 1,26                                  | [113]      |
| Sr(OH) <sub>2</sub>                                            | 298    | -0,33                                 | [1]        | RuOCl <sub>6</sub>                                                  | 299               | 0,74                                  | [114]      |
| Sr(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O                         | 298    | -0,512                                | [1]        | RuP <sub>2</sub>                                                    | 90—765            | -0,2849                               | [73]       |
| SrSO <sub>4</sub>                                              | 298    | -0,315                                | [1]        | Rh <sup>*2</sup>                                                    | 20                | 0,926                                 | [115]      |
| Y <sup>*1</sup>                                                | 90     | 2,43                                  | [1]        | Rh <sup>*2</sup>                                                    | 293               | 1,03                                  | [44]       |
| Y <sup>*1</sup>                                                | 292    | 2,15                                  | [1]        | Rh <sup>*2</sup>                                                    | 723               | 1,195                                 | [1]        |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                  | 293    | 0,197                                 | [1]        | RhCl <sub>3</sub>                                                   | 298               | -0,036                                | [1]        |
| Y <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                  | 298    | 0,365                                 | [1]        | RhF <sub>4</sub>                                                    | 293               | 2,79                                  | [1]        |
| Zr <sup>*2</sup>                                               | 90     | 1,305                                 | [1]        | Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                      | 298               | 0,408                                 | [1]        |
| Zr <sup>*2</sup>                                               | 293    | 1,33                                  | [1]        | Rh <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O  | 298               | -0,173                                | [1]        |
| ZrBr <sub>4</sub>                                              | 293    | 1,38                                  | [57]       | Rh <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·14H <sub>2</sub> O | 298               | -0,200                                | [1]        |
| ZrC                                                            | 301    | -0,261                                | [104]      | Pd <sup>*3</sup>                                                    | 20                | 7,32                                  | [115]      |
| ZrCl <sub>4</sub>                                              | 293    | -0,22                                 | [48]       | Pd <sup>*3</sup>                                                    | 288               | 5,333                                 | [1]        |
| ZrF <sub>4</sub>                                               | 303    | -0,302                                | [104]      | Pd <sup>*3</sup>                                                    | 1503              | 1,7                                   | [14]       |
| ZrI <sub>4</sub>                                               | 301    | -0,194                                | [104]      | PdCl <sub>2</sub>                                                   | 291,5             | -0,214                                | [1]        |
| ZrN                                                            | 302    | -0,191                                | [104]      | PdCl <sub>2</sub>                                                   | 300               | 0,255                                 | [116]      |
| ZrN <sub>4</sub>                                               | 293    | 0,57                                  | [48]       | Ag <sup>*4</sup>                                                    | 14                | -0,19                                 | [18]       |
| Zr(NC <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O           | 293    | -0,03                                 | [105]      | Ag <sup>*4</sup>                                                    | 293               | -0,181                                | [1]        |
| ZrO <sub>2</sub>                                               | 298    | -0,179                                | [1]        | Ag <sup>*4</sup>                                                    | 975               | -0,1786                               | [117]      |
| ZrP                                                            | 288    | -0,112                                | [1]        | Ag <sup>*4</sup>                                                    | T>T <sub>пл</sub> | -0,22 (ж)                             | [10]       |
| ZrS <sub>3</sub>                                               | 297    | -0,21                                 | [52]       | AgBr                                                                | 283               | -0,318                                | [1]        |
| ZrSiO <sub>4</sub>                                             | 90—573 | -0,19                                 | [54]       | AgC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>                      | 298               | -0,362                                | [1]        |
| Nb <sup>*3</sup>                                               | 292    | -0,215                                | [4]        | AgCN                                                                | 299               | -0,322                                | [1]        |
| Nb <sup>*3</sup>                                               | 14     | 2,34                                  | [11]       | Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                     | 298               | -0,292                                | [1]        |
| Nb <sup>*3</sup>                                               | 289    | 2,28                                  | [11]       | AgCl                                                                | 290               | -0,34                                 | [1]        |
| Nb <sup>*3</sup>                                               | 293    | 2,34                                  | [57]       | AgCrO <sub>4</sub>                                                  | 298               | -0,179                                | [1]        |
| NbH <sub>0,86</sub>                                            | 81     | 0,62                                  | [106]      | Ag <sub>2</sub> F                                                   | 297—350           | -0,274                                | [10]       |
| NbH <sub>0,86</sub>                                            | 291    | 0,70                                  | [106]      | AgF                                                                 | 298               | -0,288                                | [1]        |
| NbF <sub>4</sub>                                               | 297    | 0,580                                 | [107]      | AgI                                                                 | 298               | -0,34                                 | [1]        |
| NbO <sub>2</sub>                                               | 295    | 0,05                                  | [50]       | AgNO <sub>2</sub>                                                   | 298               | -0,273                                | [1]        |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                 | 295    | 0,09                                  | [108]      | AgNO <sub>3</sub>                                                   | 298               | -0,269                                | [1]        |
| NbP                                                            | 297    | -0,52                                 | [52]       | Ag <sub>2</sub> O                                                   | 298               | -0,578                                | [1]        |
| Mo <sup>*4</sup>                                               | 20,4   | 1,56                                  | [1]        | AgO                                                                 | 287               | -0,158                                | [1]        |
| Mo <sup>*4</sup>                                               | 63,8   | 1,13                                  | [1]        | AgP <sub>2</sub>                                                    | 298               | -0,318                                | [10]       |
| Mo <sup>*1</sup>                                               | 298    | 0,93                                  | [1]        | AgP <sub>3</sub>                                                    | 298               | -0,329                                | [10]       |
| Mo <sup>*4</sup>                                               | 293    | 0,82                                  | [44]       | Ag <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                     | 298               | -0,287                                | [1]        |
| Mo·R <sub>2</sub>                                              | 290,5  | -0,06                                 | [1]        | Ag <sub>2</sub> S                                                   | 77—1073           | 0,32                                  | [84]       |
| Mo(C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> ) <sub>4</sub>                | 293    | -0,28                                 | [109]      | (ромбическая)                                                       |                   |                                       |            |
| McF <sub>2</sub>                                               | 293    | -0,12                                 | [1]        | AgSCN                                                               | 298               | -0,3726                               | [1]        |
|                                                                |        |                                       |            | AgSC <sub>4</sub>                                                   | 299               | -0,292                                | [4]        |

\*1 См. рис. 26.8.

\*2 См. рис. 26.10, 26.19.

\*3 См. рис. 26.10.

\*4 См. рис. 26.20.

\*1 См. рис. 26.21.

\*2 См. рис. 26.22.

\*3 См. рис. 26.23.

\*4 См. рис. 26.24.

| Вещество                                                                          | T, К         | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>2</sup> /кг | Литера-тура |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------|
| Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                                   | 298          | -0,298                                | [1]         |
| Ag <sub>2</sub> Se                                                                | 77—1073      | 0,35                                  | [84]        |
| Cd* <sup>1</sup> (п/к)                                                            | 14           | -0,310                                | [10]        |
| Cd* <sup>1</sup> (п/к)                                                            | 293          | -0,176 (ТВ)                           | [1]         |
| Cd* <sup>1</sup> (п/к)                                                            | $T > T_{пл}$ | -0,160 (ж)                            | [1]         |
| Cd (м/к), $\chi_{  }$                                                             | 14           | 0,679                                 | [118]       |
| Cd (м/к), $\chi_{  }$                                                             | 293          | -0,243                                | [118]       |
| Cd (м/к), $\chi_{\perp}$                                                          | 14           | -0,130                                | [118]       |
| Cd (м/к), $\chi_{\perp}$                                                          | 293          | -0,142                                | [118]       |
| Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub>                                                   | 300          | -0,431                                | [89]        |
| CdBr <sub>2</sub>                                                                 | 298          | -0,321                                | [1]         |
| CdBr <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O                                              | 298          | -0,407                                | [1]         |
| Cd(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>                    | 298          | -0,379                                | [1]         |
| Cd(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O | 291          | -0,365                                | [4]         |
| Cd(CN) <sub>2</sub>                                                               | 298          | -0,328                                | [1]         |
| CdCO <sub>2</sub>                                                                 | 288          | -0,305                                | [4]         |
| CdCO <sub>3</sub>                                                                 | 298          | -0,271                                | [1]         |
| CdCl <sub>2</sub>                                                                 | 298          | -0,375                                | [1]         |
| CdCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O                                               | 285          | -0,368                                | [4]         |
| CdCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                              | 298          | 0,451                                 | [1]         |
| CdCrO <sub>4</sub>                                                                | 298          | -0,074                                | [1]         |
| CdF <sub>2</sub>                                                                  | 298          | -0,270                                | [1]         |
| CdI <sub>2</sub>                                                                  | 298          | -0,320                                | [1]         |
| Cd(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                                 | 298          | -0,235                                | [1]         |
| Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                                 | 298          | -0,233                                | [1]         |
| Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O                              | 298          | -0,454                                | [1]         |
| CdO                                                                               | 300          | -0,380                                | [119]       |
| CdO                                                                               | 300—900      | -0,278                                | [120]       |
| Cd(OH) <sub>2</sub>                                                               | 298          | -0,28                                 | [1]         |
| Cd <sub>3</sub> P <sub>2</sub>                                                    | 300          | -0,338                                | [89]        |
| Cd <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                                   | 298          | -0,302                                | [1]         |
| CdS                                                                               | 298          | -0,436                                | [121]       |
| CdSO <sub>4</sub>                                                                 | 298          | -0,284                                | [1]         |
| 3CdSO <sub>4</sub> ·8H <sub>2</sub> O                                             | 286          | -0,281                                | [4]         |
| CdSb                                                                              | 293          | -0,30                                 | [122]       |
| Cd <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>                                                   | 300          | -0,434                                | [89]        |
| CdSe (м/к), $\chi_{  }$                                                           | 298          | -0,354                                | [123]       |
| CdSe (м/к), $\chi_{\perp}$                                                        | 298          | -0,304                                | [123]       |
| CdP <sub>2</sub> * <sup>2</sup>                                                   | —            | -0,415                                | [124]       |
| Cd <sub>3</sub> P <sub>2</sub>                                                    | 300          | -0,16                                 | [125]       |
| In* <sup>3</sup> (п/к)                                                            | 293          | -0,077                                | [126]       |
| In* <sup>3</sup> (п/к)                                                            | 298          | -0,56                                 | [1]         |
| In (м/к), $\chi_{  }$                                                             | 293          | -0,158                                | [127]       |
| In (м/к), $\chi_{\perp}$                                                          | 293          | -0,078                                | [127]       |
| InAs                                                                              | 293          | -0,2714                               | [128]       |
| InBr <sub>3</sub>                                                                 | 298          | -0,30                                 | [1]         |
| InCl                                                                              | 298          | -0,20                                 | [1]         |
| InCl <sub>2</sub>                                                                 | 298          | -0,30                                 | [1]         |
| InCl <sub>3</sub>                                                                 | 298          | -0,57                                 | [1]         |
| InF <sub>2</sub>                                                                  | 298          | -0,40                                 | [1]         |
| InN* <sup>4</sup>                                                                 | 293          | -0,320                                | [129]       |
| In <sub>2</sub> O                                                                 | 298          | -0,191                                | [1]         |
| In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                    | 298          | -0,076                                | [1]         |
| InP* <sup>5</sup>                                                                 | 293          | -0,313                                | [130]       |
| InP <sub>0,2</sub> As <sub>0,8</sub>                                              | 293          | -0,282                                | [130]       |
| In <sub>2</sub> S                                                                 | 298          | -0,19                                 | [1]         |

| Вещество                                        | T, К              | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>2</sup> /кг | Литера-тура |
|-------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------|
| InS                                             | 298               | -0,19                                 | [1]         |
| In <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                  | 298               | -0,30                                 | [1]         |
| InS <sub>3</sub>                                | 293               | -0,19                                 | [7]         |
| InSb* <sup>1</sup>                              | 293               | -0,281                                | [130]       |
| InSb* <sup>2</sup>                              | 293               | -0,284                                | [131]       |
| InTe кубическое                                 | 293               | -0,14                                 | [132]       |
| InTe тетрагонное                                | 293               | -0,22                                 | [132]       |
| $\alpha$ -Sn (серое)                            | 273* <sup>3</sup> | -0,310                                | [130]       |
| $\alpha$ -Sn (серое)                            | 273* <sup>4</sup> | -0,265                                | [130]       |
| $\alpha$ -Sn (серое)                            | 100               | -0,267                                | [1]         |
| $\beta$ -Sn (белое)* <sup>5</sup> (п/к)         | 4,2               | 0,023                                 | [94]        |
| $\beta$ -Sn (белое)* <sup>5</sup> (п/к)         | 293               | 0,026                                 | [1; 94]     |
| $\beta$ -Sn (м/к), $\chi_{  }$                  | 293               | 0,026                                 | [127]       |
| $\beta$ -Sn (м/к), $\chi_{\perp}$               | 293               | 0,029                                 | [127]       |
| Sn                                              | $T > T_{пл}$      | -0,038 (ж)                            | [1]         |
| SnBr <sub>4</sub>                               | 298               | -0,340                                | [1]         |
| Sn(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>               | 293               | -0,738                                | [10]        |
| Sn(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> | 293               | -0,144                                | [10]        |
| Sn(C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ) <sub>4</sub> | 293               | -0,669                                | [10]        |
| SnCl <sub>2</sub>                               | 298               | -0,36                                 | [1]         |
| SnCl <sub>4</sub>                               | 298               | -0,441 (ж)                            | [1]         |
| SnCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O            | 298               | -0,405                                | [1]         |
| SnI <sub>4</sub>                                | 298               | 0,327                                 | [10]        |
| SnO                                             | 298               | -0,14                                 | [1]         |
| SnO <sub>2</sub>                                | 298               | -0,27                                 | [1]         |
| Sn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 289               | -0,33                                 | [7]         |
| Sn(OH) <sub>4</sub>                             | 293               | -0,321                                | [1]         |
| SnO(OH) <sub>2</sub>                            | 293               | -0,278                                | [30]        |
| SnSO <sub>4</sub>                               | 291               | -0,29                                 | [30]        |
| SnSe                                            | 293               | -0,10                                 | [93]        |
| Sb* <sup>6</sup> (п/к)                          | 293               | -0,81 (ТВ)                            | [1]         |
| Sb* <sup>6</sup> (п/к)                          | $T > T_{пл}$      | -0,02 (ж)                             | [1]         |
| Sb (м/к), $\chi_{  }$                           | 90                | -1,73                                 | [133]       |
| Sb (м/к), $\chi_{  }$                           | 293               | -1,42                                 | [133]       |
| Sb (м/к), $\chi_{\perp}$                        | 90                | -0,50                                 | [133]       |
| Sb (м/к), $\chi_{\perp}$                        | 293               | -0,50                                 | [133]       |
| SbBr <sub>3</sub>                               | 298               | -0,318                                | [1]         |
| Sb(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> | 298               | -0,515                                | [10]        |
| SbCd                                            | 293               | -0,213                                | [134]       |
| SbCl <sub>3</sub>                               | 298               | -0,380                                | [1]         |
| SbCl <sub>5</sub>                               | 298               | -0,401 (ж)                            | [1]         |
| SbF <sub>3</sub>                                | 298               | -0,256                                | [1]         |
| SbI <sub>3</sub>                                | 298               | -0,293                                | [1]         |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 298               | -0,238                                | [1]         |
| SbOCl                                           | 298               | -0,214                                | [10]        |
| Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                  | 298               | -0,25                                 | [1]         |
| Sb <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> * <sup>7</sup>  | 130—500           | -0,383                                | [135]       |
| Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>                 | 130—150           | -0,398                                | [135]       |
| SbZn                                            | 293               | -0,285                                | [134]       |
| SbZn <sub>3</sub>                               | 293               | -0,261                                | [134]       |
| SbZn <sub>3</sub>                               | $T > T_{пл}$      | -0,107 (ж)                            | [134]       |
| Te* <sup>8</sup>                                | 14,2              | -0,293                                | [136]       |
| Te* <sup>8</sup>                                | 293               | -0,283 (0,005)                        | [37]        |
| Te* <sup>8</sup>                                | $T > T_{пл}$      | -0,05 (ж)                             | [1]         |

\*<sup>1</sup>  $n = 6,2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>.\*<sup>2</sup>  $n = 4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>.\*<sup>3</sup>  $n = 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.\*<sup>4</sup> Решеточная часть.\*<sup>5</sup> См. рис. 26.27.\*<sup>6</sup> См. рис. 26.28.\*<sup>7</sup>  $\rho$ -Проводимость.\*<sup>8</sup> См. рис. 26.29.\*<sup>1</sup> См. рис. 26.25.\*<sup>2</sup> Восприимчивость решетки.\*<sup>3</sup> См. рис. 26.26.\*<sup>4</sup> Решеточная часть  $\chi$ .\*<sup>5</sup>  $n = 1,9 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

| Вещество                                                                         | T, К         | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литература |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------|------------|
| Te* <sup>1</sup> (м/к), $\chi_{\parallel}$                                       | 293          | -0,329                                | [10]       |
| Te* <sup>1</sup> , $\chi_{\perp}$                                                | 293          | -0,296                                | [10]       |
| TeBr <sub>2</sub>                                                                | 298          | -0,369                                | [11]       |
| TeCl <sub>2</sub>                                                                | 298          | -0,474                                | [11]       |
| TeF <sub>6</sub>                                                                 | 298          | -0,273                                | [11]       |
| TeO <sub>2</sub>                                                                 | 291          | -0,14                                 | [7]        |
| TeO <sub>2</sub> H <sub>2</sub>                                                  | 298          | -0,216                                | [10]       |
| Te(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>                                | 298          | -0,402                                | [10]       |
| Te(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> I <sub>2</sub>                                 | 298          | -0,353                                | [10]       |
| I <sub>2</sub>                                                                   | 14           | -0,313 (ТВ)                           | [136]      |
| I <sub>2</sub>                                                                   | 298          | -0,35 (ТВ)                            | [11]       |
| I <sub>2</sub>                                                                   | 368          | -0,38 (ТВ)                            | [14]       |
| I <sub>2</sub>                                                                   | 386          | -0,39 (Ж)                             | [14]       |
| I <sub>2</sub>                                                                   | 433          | -0,33 (Ж)                             | [14]       |
| I <sub>1</sub> (атомарный)                                                       | 1303         | 6,85 (г)                              | [11]       |
| I <sub>1</sub> (атомарный)                                                       | 1440         | 8,82 (г)                              | [11]       |
| I <sub>2</sub> (м/к), $\chi_a$                                                   | 298          | -0,354                                | [137]      |
| I <sub>2</sub> (м/к), $\chi_b$                                                   | 298          | -0,331                                | [137]      |
| I <sub>2</sub> (м/к), $\chi_c$                                                   | 298          | -0,336                                | [137]      |
| ICl                                                                              | 285          | -0,336 (Ж)                            | [11]       |
| ICl <sub>2</sub>                                                                 | 288          | -0,387 (Р)                            | [4]        |
| ICl <sub>3</sub>                                                                 | 298          | -0,387                                | [11]       |
| IF <sub>5</sub>                                                                  | 298          | -0,262                                | [11]       |
| IN                                                                               | 195          | -0,369 (ТВ)                           | [10]       |
| IN                                                                               | 281          | -0,373 (ТВ)                           | [10]       |
| Xe                                                                               | 298          | -0,33                                 | [11]       |
| Cs* <sup>2</sup>                                                                 | 298          | 0,23                                  | [9]        |
| Cs* <sup>2</sup>                                                                 | $T > T_{пл}$ | 0,20 (Ж)                              | [11]       |
| CsBr                                                                             | 298          | -0,316                                | [11]       |
| CsBrO <sub>3</sub>                                                               | 298          | -0,288                                | [11]       |
| Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                                  | 298          | -0,318                                | [11]       |
| CsCl                                                                             | 298          | -0,337 (ТВ)                           | [11]       |
| CsClO <sub>3</sub>                                                               | 298          | -0,30                                 | [11]       |
| CsF                                                                              | 298          | -0,293                                | [11]       |
| CsI                                                                              | 298          | -0,318                                | [11]       |
| CsIO <sub>3</sub>                                                                | 298          | -0,270                                | [11]       |
| CsNO <sub>3</sub>                                                                | 298          | -0,279                                | [10]       |
| Cs <sub>2</sub> S                                                                | 298          | -0,349                                | [11]       |
| Cs <sub>2</sub> S <sub>2</sub>                                                   | 298          | -0,355                                | [10]       |
| Cs <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                                   | 298          | -0,354                                | [10]       |
| Cs <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                                                   | 298          | -0,353                                | [10]       |
| Cs <sub>2</sub> S <sub>5</sub>                                                   | 298          | -0,352                                | [10]       |
| Cs <sub>2</sub> S <sub>6</sub>                                                   | 298          | -0,349                                | [10]       |
| Cs <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                                  | 298          | -0,321                                | [11]       |
| Cs <sub>2</sub> Se                                                               | 298          | -0,331                                | [10]       |
| Ba                                                                               | 293          | 0,150                                 | [11]       |
| Ba                                                                               | 573          | 0,316                                 | [138]      |
| Ba                                                                               | 673          | 0,415                                 | [138]      |
| BaBr <sub>2</sub>                                                                | 298          | -0,31                                 | [11]       |
| BaBr <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                             | 298          | -0,357                                | [11]       |
| Ba(BrO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                               | 298          | -0,269                                | [11]       |
| Ba(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O | 298          | -0,366                                | [11]       |
| BaCO <sub>3</sub>                                                                | 298          | -0,298                                | [11]       |
| BaCl <sub>2</sub>                                                                | 298          | -0,35                                 | [11]       |
| BaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                             | 298          | -0,409                                | [11]       |
| Ba(ClO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                               | 298          | -0,288                                | [11]       |
| BaF <sub>2</sub>                                                                 | 298          | -0,291                                | [11]       |
| BaI <sub>2</sub>                                                                 | 298          | -0,317                                | [11]       |
| BaI <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                              | 298          | -0,38                                 | [11]       |
| Ba(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                                | 298          | -0,251                                | [11]       |

\*<sup>1</sup> При повышении температуры  $\chi_{\parallel}$  уменьшается, а  $\chi_{\perp}$  почти постоянна; при  $T = 493$  К  $\chi_{\parallel} = \chi_{\perp}$ .

\*<sup>2</sup> При уменьшении температуры от 298 до 78 К значение  $\chi$  увеличивается на 12%.

| Вещество                                                           | T, К    | $\chi$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> /кг | Литература |
|--------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------|
| Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                  | 298     | -0,254                                | [11]       |
| BaO                                                                | 298     | -0,19                                 | [11]       |
| BaO <sub>2</sub>                                                   | 298     | -0,240                                | [11]       |
| Ba(OH) <sub>2</sub>                                                | 298     | -0,31                                 | [11]       |
| Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O                             | 298     | -0,497                                | [11]       |
| BaS                                                                | 291     | -0,32                                 | [7]        |
| BaSO <sub>4</sub>                                                  | 298     | -0,306                                | [11]       |
| BaS <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ·2H <sub>2</sub> O                 | 293     | -0,359                                | [30]       |
| La* <sup>1</sup>                                                   | 293     | 0,73                                  | [139]      |
| La* <sup>1</sup>                                                   | 298     | 0,85                                  | [11]       |
| LaB <sub>6</sub>                                                   | 298     | -0,294                                | [10]       |
| LaCl <sub>3</sub>                                                  | 288     | 5,6                                   | [7]        |
| La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>                                  | 298     | -0,072                                | [10]       |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     | 298     | -0,24                                 | [11]       |
| La <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                     | 292     | -0,099                                | [11]       |
| La <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                                     | 293     | -0,246                                | [11]       |
| La <sub>2</sub> S <sub>5</sub>                                     | 293     | -0,03                                 | [140]      |
| La <sub>2</sub> S <sub>6</sub>                                     | 293     | -0,26                                 | [140]      |
| La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                    | 293     | -0,30                                 | [43]       |
| La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O | 293     | -23                                   | [11]       |
| Hf* <sup>2</sup>                                                   | 4,2     | 0,46                                  | [141]      |
| Hf* <sup>2</sup>                                                   | 77      | 0,40                                  | [141]      |
| Hf* <sup>2</sup>                                                   | 293     | 0,39                                  | [142]      |
| HfO <sub>2</sub>                                                   | 293     | -0,109                                | [65]       |
| HfP                                                                | 297     | -0,10                                 | [52]       |
| HfS <sub>2</sub>                                                   | 293     | 0,005                                 | [53]       |
| HfS <sub>3</sub>                                                   | 90—573  | -0,21                                 | [143]      |
| Ta* <sup>3</sup> (п/к)                                             | 293     | 0,85                                  | [11]       |
| Ta* <sup>3</sup> (п/к)                                             | 2143    | 0,685                                 | [11]       |
| TaBr <sub>4</sub>                                                  | 293     | -0,15                                 | [144]      |
| TaCl <sub>5</sub>                                                  | 304     | 0,391                                 | [11]       |
| Ta <sub>2</sub> N <sub>5</sub>                                     | 293     | -0,008                                | [145]      |
| TaO <sub>2</sub>                                                   | 293     | 0,32                                  | [146]      |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> * <sup>4</sup>                      | 293     | -0,095                                | [145]      |
| TaON                                                               | 293     | -0,064                                | [145]      |
| TaP                                                                | 297     | -0,62                                 | [52]       |
| TaBr <sub>4</sub>                                                  | 293     | -0,15                                 | [144]      |
| W* <sup>5</sup>                                                    | 293     | 0,29                                  | [44]       |
| WBr <sub>4</sub>                                                   | 297     | -0,149                                | [147]      |
| WBr <sub>6</sub>                                                   | 293     | 0,03                                  | [148]      |
| WC                                                                 | 293     | 0,05                                  | [11]       |
| WCl <sub>2</sub>                                                   | 293     | -0,098                                | [11]       |
| WCl <sub>4</sub>                                                   | 303     | -0,178                                | [147]      |
| WCl <sub>6</sub>                                                   | 298     | -0,179                                | [11]       |
| WF <sub>6</sub>                                                    | 298     | -0,134 (Ж)                            | [11]       |
| WO <sub>2</sub>                                                    | 298     | 0,264                                 | [11]       |
| W <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                      | 293     | 0,20                                  | [148]      |
| WO <sub>3</sub>                                                    | 298     | -0,068                                | [11]       |
| Re* <sup>6</sup>                                                   | 293     | 0,363                                 | [11]       |
| ReO <sub>2</sub> (ромбический)                                     | 77—300  | 0,25                                  | [149]      |
| ReO <sub>2</sub> (моноклинный)                                     | 300     | 0,44                                  | [149]      |
| Re <sub>2</sub> O <sub>2</sub>                                     | 293     | 0,2                                   | [150]      |
| ReO <sub>3</sub>                                                   | 298     | 0,088                                 | [151]      |
| Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                                     | 298     | -0,033                                | [11]       |
| ReO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                | 295     | -0,291                                | [11]       |
| ReS                                                                | 293     | 0,2                                   | [152]      |
| ReS <sub>2</sub>                                                   | 290,5   | -0,50                                 | [153]      |
| Re <sub>2</sub> S <sub>7</sub>                                     | 290—373 | 0,19                                  | [153]      |
| Os                                                                 | 298     | 0,052                                 | [11]       |

\*<sup>1</sup> См. рис. 26.8.

\*<sup>2</sup> См. рис. 26.9. 26.30.

\*<sup>3</sup> См. рис. 26.31.

\*<sup>4</sup> При  $H \rightarrow \infty$ .

\*<sup>5</sup> См. рис. 26.32.

\*<sup>6</sup> См. рис. 26.32.



| Вещество                         | T, К         | $\gamma$ , $10^{-9}$ м³/кг | Литература |
|----------------------------------|--------------|----------------------------|------------|
| Os                               | 698          | 0,070                      | [10]       |
| Os                               | $T > T_{пл}$ | 0,14 (ж)                   | [10]       |
| OsAs <sub>2</sub>                | 90—800       | —0,3279                    | [73]       |
| OsCl <sub>2</sub>                | 298          | 0,158                      | [10]       |
| OsCl <sub>3</sub>                | 295,5        | 3,04                       | [154]      |
| OsCl <sub>4</sub> (ромбический)  | 300          | 3,25                       | [155]      |
| OsCl <sub>4</sub> (кубический)   | 300          | 2,65                       | [155]      |
| OsI <sub>3</sub>                 | 295          | 0,557                      | [156]      |
| OsO <sub>2</sub>                 | 77           | 0,536                      | [157]      |
| OsO <sub>2</sub>                 | 300          | 0,528                      | [157]      |
| OsO <sub>4</sub>                 | 77           | —0,045                     | [157]      |
| OsO <sub>4</sub>                 | 300          | —0,048                     | [157]      |
| OsP <sub>2</sub>                 | 90—760       | —0,3845                    | [88]       |
| Ir* <sup>1</sup>                 | 293          | 0,14                       | [26]       |
| Ir* <sup>1</sup>                 | 698          | 0,167                      | [1]        |
| Ir* <sup>1</sup>                 | 1423         | 0,31                       | [14]       |
| IrBr <sub>3</sub>                | 293          | —0,2                       | [158]      |
| IrCl <sub>3</sub> (ромбический)  | 298          | —0,183                     | [159]      |
| IrCl <sub>3</sub> (моноклинный)  | 298          | 0                          | [159]      |
| IrO <sub>2</sub> (м/к), $\chi_a$ | 300          | 0,92 (0,02)                | [160]      |
| IrO <sub>2</sub> (м/к), $\chi_c$ | 300          | 0,83 (0,02)                | [160]      |
| Pt* <sup>2</sup>                 | 20           | 1,094                      | [115]      |
| Pt* <sup>2</sup>                 | 293          | 0,97                       | [44]       |
| Pt* <sup>2</sup>                 | 623          | 0,795                      | [161]      |
| Pt* <sup>2</sup>                 | 1493         | 0,30                       | [14]       |
| PtCl                             | 298          | —0,51                      | [161]      |
| PtCl <sub>2</sub>                | 295          | 0,188                      | [162]      |
| PtCl <sub>3</sub>                | 298          | —0,221                     | [1]        |
| PtCl <sub>4</sub>                | 298          | —0,276                     | [1]        |
| PtCl <sub>2</sub> CO             | 293          | —0,289                     | [109]      |
| PtCl <sub>2</sub> ·2CO           | 293          | —0,37                      | [109]      |
| Pt <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 298          | —0,086                     | [1]        |
| PtI <sub>2</sub>                 | 300          | 0,225                      | [163]      |
| PtI <sub>3</sub>                 | 300          | 0,234                      | [163]      |
| PtI <sub>4</sub>                 | 300          | 0,285                      | [163]      |
| PtS                              | 195—723      | —0,14                      | [164]      |
| PtS <sub>2</sub>                 | 90—723       | —0,28                      | [164]      |
| PtSe                             | 195—723      | —0,11                      | [164]      |
| PtSe <sub>2</sub>                | 90—723       | —0,13                      | [164]      |
| PtTe                             | 195—723      | —0,12                      | [164]      |
| PtTe <sub>2</sub>                | 90—723       | —0,05                      | [164]      |
| Au* <sup>3</sup>                 | 14           | —0,132                     | [165]      |
| Au* <sup>3</sup>                 | 296          | —0,142                     | [1]        |
| Au* <sup>3</sup>                 | 975          | —0,1417                    | [117]      |
| Au* <sup>3</sup>                 | $T > T_{пл}$ | —0,17                      | [1]        |
| AuBr                             | 298          | —0,22                      | [1]        |
| AuCl <sub>3</sub>                | 298          | —0,37                      | [1]        |
| AuCl                             | 298          | —0,288                     | [1]        |
| AuF <sub>3</sub>                 | 298          | 0,291                      | [1]        |
| AuI                              | 298          | —0,28                      | [1]        |
| AuP <sub>3</sub>                 | 298          | —0,369                     | [1]        |
| Hg* <sup>4</sup> (п/к)           | 80           | —0,118 (тв)                | [166]      |
| Hg* <sup>4</sup> (п/к)           | 293          | —0,167 (ж)                 | [1]        |
| Hg* <sup>4</sup> (п/к)           | 560,5        | —0,1637 (ж)                | [167]      |
| Hg* <sup>4</sup> (п/к)           | $T > T_{пл}$ | —0,39 (г)                  | [1]        |
| Hg (м/к), $\chi_{  }$            | 80           | —0,112                     | [166]      |
| Hg (м/к), $\chi_{\perp}$         | 80           | —0,121                     | [166]      |
| HgBr <sub>2</sub>                | 298          | —0,261                     | [1]        |
| HgBr                             | 298          | —0,204                     | [1]        |

| Вещество                                                                     | T, К         | $\gamma$ , $10^{-9}$ м³/кг | Литература |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------|------------|
| HgBrO <sub>3</sub>                                                           | 298          | —0,239                     | [10]       |
| Hg(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                            | 293          | —0,199                     | [36]       |
| Hg(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub>                              | 293          | —0,158                     | [33]       |
| Hg(C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ) <sub>2</sub>                              | 293          | —0,115                     | [35]       |
| Hg(C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> ) <sub>2</sub>                             | 293          | —0,103                     | [36]       |
| Hg(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>               | 301          | —0,317                     | [1]        |
| Hg <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> | 300          | —0,276                     | [4]        |
| Hg(CN) <sub>2</sub>                                                          | 298          | —0,265                     | [1]        |
| HgCl                                                                         | 298          | —0,22 (тв)                 | [1]        |
| HgCl                                                                         | $T > T_{пл}$ | —0,248 (ж)                 | [10]       |
| HgCl <sub>2</sub>                                                            | 298          | —0,302                     | [1]        |
| Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>                                              | 298          | —0,253                     | [4]        |
| HgCrO <sub>4</sub>                                                           | 298          | —0,039                     | [1]        |
| Hg <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>                                             | 298          | —0,122                     | [1]        |
| HgF                                                                          | 298          | —0,241                     | [1]        |
| HgF <sub>2</sub>                                                             | 302          | —0,260                     | [1]        |
| HgI                                                                          | 298          | —0,253                     | [1]        |
| HgI <sub>2</sub>                                                             | 298          | —0,283                     | [1]        |
| HgIO <sub>3</sub>                                                            | 298          | —0,245                     | [1]        |
| HgNO <sub>3</sub>                                                            | 298          | —0,213                     | [1]        |
| Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                            | 298          | —0,228                     | [1]        |
| Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O                         | 298          | —0,225                     | [4]        |
| HgO                                                                          | 298          | —0,20                      | [1]        |
| Hg <sub>2</sub> O                                                            | 298          | —0,183                     | [1]        |
| Hg <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>                                            | 298          | —0,23                      | [1]        |
| HgS                                                                          | 298          | —0,238                     | [1]        |
| Hg(SCN) <sub>2</sub>                                                         | 298          | —0,305                     | [1]        |
| HgSO <sub>4</sub>                                                            | 298          | —0,263                     | [1]        |
| Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                              | 298          | —0,247                     | [1]        |
| $\alpha$ -Ti (п/к) (гексагональный)                                          | 14,2         | —0,258                     | [136]      |
| $\alpha$ -Ti (п/к) (гексагональный)                                          | 298          | —0,249                     | [1]        |
| $\beta$ -Ti [(п/к) (кубический)]                                             | $> 508$      | —0,158                     | [1]        |
| Ti                                                                           | 573          | —0,131 (ж)                 | [1]        |
| $\alpha$ -Ti* <sup>1</sup> (м/к), $\chi_{  }$                                | 293          | —0,420                     | [10]       |
| $\alpha$ -Ti* <sup>1</sup> (м/к), $\chi_{\perp}$                             | 293          | —0,164                     | [168]      |
| TiBr                                                                         | 298          | —0,225                     | [1]        |
| TiBrO <sub>3</sub>                                                           | 298          | —0,228                     | [1]        |
| TiC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>                               | 298          | —0,262                     | [1]        |
| TiCN                                                                         | 298          | —0,213                     | [1]        |
| TiCNS                                                                        | 298          | —0,254                     | [1]        |
| TiCO <sub>3</sub>                                                            | 298          | —0,217                     | [1]        |
| TiCl                                                                         | 298          | —0,241                     | [1]        |
| TiClO <sub>3</sub>                                                           | 298          | —0,228                     | [1]        |
| TiCrO <sub>4</sub>                                                           | 298          | —0,075                     | [1]        |
| TiF                                                                          | 298          | —0,199                     | [1]        |
| TiI                                                                          | 298          | —0,248                     | [1]        |
| TiIO <sub>3</sub>                                                            | 298          | —0,229                     | [1]        |
| TiNO <sub>2</sub>                                                            | 298          | —0,203                     | [1]        |
| TiNO <sub>3</sub>                                                            | 298          | —0,212                     | [1]        |
| Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                               | 298          | —0,166                     | [1]        |
| Ti <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                              | 298          | —0,304                     | [1]        |
| Ti <sub>2</sub> S                                                            | 298          | —0,201                     | [1]        |
| Ti <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                              | 298          | —0,223                     | [1]        |
| Pb (п/к)                                                                     | 14,2         | —0,132                     | [109]      |
| Pb (п/к)                                                                     | 289          | —0,111                     | [1]        |
| Pb                                                                           | 330          | —0,075 (ж)                 | [1]        |
| Pb* <sup>2</sup> (м/к)                                                       | 293          | —0,114                     | [127]      |
| PbBr <sub>2</sub>                                                            | 298          | —0,247                     | [1]        |

\*<sup>1</sup> См. рис. 26.21.\*<sup>2</sup> См. рис. 26.33.\*<sup>3</sup> См. рис. 26.34.\*<sup>4</sup> См. рис. 26.35.\*<sup>1</sup> См. рис. 26.6.\*<sup>2</sup> См. рис. 26.27; анизотропия  $\chi$  в плоскости (100) отсутствует [130].

| Вещество                                                       | T, К                | $\chi \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ | Литера-<br>тура |
|----------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|-----------------|
| Pb(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> | 298                 | -0,274                                     | [1]             |
| Pb(CNS) <sub>2</sub>                                           | 298                 | -0,254                                     | [1]             |
| PbCO <sub>3</sub>                                              | 298                 | -0,229                                     | [1]             |
| PbCl <sub>2</sub>                                              | 298                 | -0,265                                     | [1]             |
| PbCrO <sub>4</sub>                                             | 298                 | -0,056                                     | [1]             |
| PbF <sub>2</sub>                                               | 298                 | -0,237                                     | [1]             |
| PbI <sub>2</sub>                                               | 298                 | -0,274                                     | [1]             |
| Pb(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                              | 298                 | -0,235                                     | [1]             |
| Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                              | 298                 | -0,223                                     | [1]             |
| PbO                                                            | 298                 | -0,19                                      | [1]             |
| PbO <sub>2</sub>                                               | 293                 | -0,09                                      | [169]           |
| Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                                 | 291                 | -0,24                                      | [7]             |
| Pb <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                | 298                 | -0,224                                     | [1]             |
| PbS (порошок)                                                  | 293                 | -0,342                                     | [170]           |
| PbS                                                            | 293                 | -0,390                                     | [170]           |
| PbSO <sub>4</sub>                                              | 298                 | -0,230                                     | [1]             |
| PbSe* <sup>1</sup>                                             | 293                 | -0,447                                     | [135]           |
| PbTe                                                           | 293                 | -0,446 (тв)                                | [135]           |
| PbTe                                                           | 293                 | -0,051 (ж)                                 | [134]           |
| Bi* <sup>2</sup> (п/к)                                         | 14                  | -1,55                                      | [171]           |
| Bi* <sup>2</sup> (п/к)                                         | 298                 | -1,34                                      | [1]             |
| Bi* <sup>2</sup>                                               | $T > T_{\text{пл}}$ | -0,0502 (ж)                                | [1]             |
| Bi (м/к), $\chi_{\parallel}$                                   | 14                  | -1,20                                      | [171]           |
| Bi (м/к), $\chi_{\parallel}$                                   | 85                  | -1,295                                     | [172]           |
| Bi (м/к), $\chi_{\parallel}$                                   | 298                 | -1,053                                     | [173]           |
| Bi (м/к), $\chi_{\perp}$                                       | 14                  | -1,77                                      | [171]           |
| Bi (м/к), $\chi_{\perp}$                                       | 85                  | -2,04                                      | [172]           |
| Bi (м/к), $\chi_{\perp}$                                       | 298                 | -1,482                                     | [173]           |
| BiBr <sub>3</sub>                                              | 298                 | -0,328                                     | [1]             |
| BiCl <sub>3</sub>                                              | 298                 | -0,084                                     | [1]             |
| Bi <sub>2</sub> (CrO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>               | 298                 | 0,201                                      | [1]             |
| BiF <sub>3</sub>                                               | 303                 | -0,23                                      | [1]             |
| BiI <sub>3</sub>                                               | 298                 | -0,34                                      | [1]             |
| Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>                              | 298                 | -0,23                                      | [1]             |
| Bi(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O           | 298                 | -0,328                                     | [1]             |
| BiO                                                            | 298                 | -0,49                                      | [1]             |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | 298                 | -0,18                                      | [1]             |
| Bi(OH) <sub>3</sub>                                            | 298                 | -0,253                                     | [1]             |
| PiPO <sub>4</sub>                                              | 298                 | -0,253                                     | [1]             |
| Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                 | 298                 | -0,239                                     | [1]             |
| Bi <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                | 298                 | -0,282                                     | [1]             |
| Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>                                | 130—600             | -0,410                                     | [135]           |
| BiTe                                                           | 293                 | -0,57                                      | [13]            |
| Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>                                | 130—600             | -0,402                                     | [135]           |
| Th                                                             | 90                  | 0,66                                       | [1]             |
| Th                                                             | 298                 | 0,57                                       | [1]             |
| Th                                                             | 130—300             | 0,410                                      | [174]           |
| ThCl <sub>4</sub> ·8H <sub>2</sub> O                           | 305,2               | -0,348                                     | [1]             |
| Th(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>                              | 298                 | -0,225                                     | [1]             |
| ThO <sub>2</sub>                                               | 83                  | -0,056                                     | [175]           |
| ThO <sub>2</sub>                                               | 298                 | -0,061                                     | [1]             |
| $\alpha$ -U* <sup>3</sup>                                      | 80                  | 1,63                                       | [176]           |
| $\alpha$ -U* <sup>3</sup>                                      | 293                 | 1,72                                       | [176]           |
| $\alpha$ -U* <sup>3</sup>                                      | 623                 | 1,85                                       | [1]             |
| $\beta$ -U* <sup>3,4</sup>                                     | 288—1193            | 2,02                                       | [176]           |

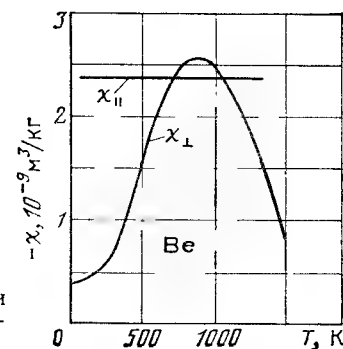
\*<sup>1</sup> Расчетная часть  $\chi$ .\*<sup>2</sup> См. рис. 26.36.\*<sup>3</sup> См. рис. 26.37.\*<sup>4</sup>  $\alpha$ -U переходит в  $\beta$ -U при  $T = 933 \text{ К}$ .

| Вещество                       | T, К     | $\chi \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ | Литера-<br>тура |
|--------------------------------|----------|--------------------------------------------|-----------------|
| $\gamma$ -U* <sup>1</sup>      | 288—1193 | 2,06                                       | [176]           |
| UF <sub>6</sub>                | 90       | 0,01                                       | [177]           |
| UF <sub>6</sub>                | 293      | 0,12                                       | [177]           |
| UO <sub>3</sub>                | 293      | 4,5                                        | [1]             |
| UOS                            | 290,5    | 10,527                                     | [178]           |
| U <sub>2</sub> S <sub>2</sub>  | 293      | 4,545                                      | [179]           |
| U <sub>3</sub> Se <sub>5</sub> | 293      | 3,567                                      | [180]           |
| $\alpha$ -Np                   | 300      | 2,34                                       | [181]           |
| $\alpha$ -Pu* <sup>2</sup>     | 293      | 2,5                                        | [1]             |
| $\alpha$ -Pu* <sup>3</sup>     | 78—793   | 2,35* <sup>2</sup>                         | [181]           |
| $\beta$ -Pu* <sup>4</sup>      | 78—793   | 2,44* <sup>2</sup>                         | [182]           |
| $\gamma$ -Pu* <sup>5</sup>     | 78—793   | 2,36* <sup>2</sup>                         | [182]           |
| $\delta$ -Pu* <sup>6</sup>     | 78—793   | 2,31                                       | [182]           |
| $\epsilon$ -Pu                 | 78—793   | 2,36                                       | [182]           |
| PuF <sub>6</sub>               | 295      | 0,483                                      | [1]             |
| PuO <sub>2</sub>               | 300      | 2,645                                      | [1]             |
| Am                             | 300      | 4,0                                        | [1]             |
| Am                             | 300      | 2,82                                       | [181]           |

\*<sup>1</sup>  $\beta$ -U переходит в  $\gamma$ -U при  $T = 1040 \text{ К}$ .\*<sup>2</sup> См. рис. 26.38;  $\alpha$ -Pu переходит в  $\beta$ -Pu при  $T = 400 \text{ К}$ .\*<sup>3</sup> Приведено среднее значение  $\chi$  для указанного интервала.\*<sup>4</sup>  $\beta$ -Pu переходит в  $\gamma$ -Pu при  $T = 490 \text{ К}$ .\*<sup>5</sup>  $\gamma$ -Pu переходит в  $\delta$ -Pu при  $T = 590 \text{ К}$ .\*<sup>6</sup>  $\delta$ -Pu переходит в  $\epsilon$ -Pu при  $T = 740 \text{ К}$ .Таблица 26.2. Магнитная восприимчивость  
парамагнетиков, температурная зависимость которых  
удовлетворяет закону Кюри — Вейсса

| Вещество                                        | T, К  | $10^9 \frac{\chi}{\text{кг} \cdot \text{м}^3} \cdot T$ | $\Delta T, \text{ К}$ | $P_{\text{эф}}, \nu_B$ | $\theta, \text{ К}$ | Литера-<br>тура |
|-------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------------|
| Sc (тв)                                         | 292   | 7,0                                                    | —                     | 1,8                    | -950÷<br>-1000      | [10]            |
| TiBr <sub>2</sub>                               | 288   | 3,10                                                   | 90—300                | 2,8                    | -1110               | [10]            |
| TiS <sub>2</sub>                                | 296   | 0,408                                                  | —                     | 0,52                   | —                   | [53]            |
| Ti <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | —     | —                                                      | 14—290                | 1,41                   | —                   | [10]            |
| VBr <sub>2</sub>                                | 293   | 15,3                                                   | —                     | 4,30                   | -400                | [191]           |
| VBr <sub>3</sub>                                | 293   | 9,95                                                   | —                     | 2,72                   | -20                 | [191]           |
| VCl <sub>2</sub>                                | 293   | 19,8                                                   | 14—300                | 4,15                   | -565                | [10]            |
| VCl <sub>4</sub>                                | 293,8 | 5,86                                                   | —                     | 1,62                   | ±1                  | [192]           |
| VF <sub>3</sub>                                 | 293   | 2,53                                                   | —                     | 2,55                   | —                   | [193]           |
| VI <sub>2</sub>                                 | 295   | 14,0                                                   | —                     | 3,32                   | -140                | [194]           |
| (красный)<br>VI <sub>2</sub>                    | 90    | 26,6                                                   | —                     | 2,43                   | —                   | [194]           |
| (красный)<br>VI <sub>2</sub>                    | 295   | 13,8                                                   | —                     | 3,27                   | -140                | [194]           |
| (черный)<br>VI <sub>2</sub>                     | 90    | 26,3                                                   | —                     | 2,42                   | —                   | [194]           |
| (черный)<br>VI <sub>3</sub>                     | 295   | 8,02                                                   | —                     | 2,92                   | —                   | [194]           |
| VI <sub>3</sub>                                 | 90    | 39,0                                                   | —                     | 3,50                   | —                   | [194]           |
| VOCl                                            | 293   | 20,3                                                   | —                     | 2,22                   | —                   | [195]           |
| VTc                                             | 293   | >0                                                     | —                     | 1,7                    | 0                   | [10]            |
| CrB <sub>2</sub>                                | —     | —                                                      | 100—600               | 2,07                   | -1550               | [196]           |
| CrH                                             | 295   | 13,63                                                  | —                     | 1,77                   | -247                | [197]           |
| CrSO <sub>4</sub>                               | —     | —                                                      | —                     | 4,80                   | —                   | [198]           |
| Cr <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 293   | 30,1                                                   | 90—900                | 3,84                   | -16                 | [19]            |
| MnF <sub>4</sub>                                | —     | —                                                      | 90—295                | 3,84                   | -10                 | [199]           |
| Fe(OH) <sub>2</sub>                             | 301,4 | 124,6                                                  | —                     | 5,22                   | —                   | [200]           |
| Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 283   | 30,6                                                   | 65—300                | 5,8                    | -65                 | [10]            |

| Вещество                     | $T, K$  | $\chi, 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ | $\Delta T, K$ | $\nu_{\text{эф}}, \mu_B$ | $\theta, K$ | Литература  |
|------------------------------|---------|--------------------------------------------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------|
| $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ | —       | —                                                | 300—900       | 5,8                      | —75         | [10]        |
| $\text{Co}_2\text{O}_3$      | 293     | 27,5                                             | —             | 2,3                      | —           | [201]       |
| $\text{CoTe}_2$              | 293     | 3,11                                             | 90—723        | 2,81                     | —540        | [202]       |
| $\text{NiI}_2$               | 293     | 12,4                                             | 83—603        | 3,25                     | —42         | [10]        |
| $\text{NiS}_2$               | —       | —                                                | 4—440         | 3,15                     | —2100       | [203]       |
| $\text{NiS}_2$               | —       | —                                                | 440—900       | 2,70                     | —1000       | [203]       |
| $\text{NiTe}$                | 293     | 0,844                                            | —             | 0,61                     | —           | [204]       |
| $\text{NiTe}$                | —       | —                                                | 90—600        | 0,99                     | —1100       | [205]       |
| $\text{NiTe}_2$              | 293     | 0,445                                            | 100—400       | 0,57                     | —           | [204]       |
| $\text{CuS}_2$               | 298     | 0,29                                             | 4,2—100       | 0,58                     | —25         | [206]       |
| $\text{ZrBr}_3$              | 300     | 0,18                                             | —             | $\approx 0,4$            | —           | [207]       |
| $\text{ZrCl}_2$              | 300     | 0,925                                            | —             | 0,6                      | —           | [207]       |
| $\text{ZrCl}_3$              | 300     | 0,35                                             | —             | $\approx 0,4$            | —           | [207]       |
| $\text{ZrS}_2$               | 296     | 0,535                                            | —             | 0,61                     | —           | [53]        |
| $\text{NbF}_3$               | 293     | 0,95                                             | —             | 0,7                      | —180        | [208]       |
| $\text{NbO}$                 | 295     | 0,29                                             | 1,5—150       | 0,052                    | —           | [108]       |
| $\text{NbO}_2$               | 295     | 0,05                                             | —             | 0,32                     | —           | [209]       |
| $\text{Nb}_2\text{O}_5$      | 295     | 0,09                                             | 1,5—150       | 0,237                    | 0           | [108]       |
| $\text{NbS}_2$               | 293     | 0,39                                             | —             | 0,98                     | —1100       | [146]       |
| $\text{MoBr}_2$              | 293     | 1,34                                             | —             | 0,35                     | —           | [210]       |
| $\text{MoBr}_3$              | 293     | 1,56                                             | —             | 1,24                     | —           | [210]       |
| $\text{MoBr}_4$              | 293     | 1,62                                             | —             | 1,02                     | —           | [210]       |
| $\text{MoCl}_3$              | 290     | 0,21                                             | —             | 0,67                     | —           | [210]       |
| $\text{MoCl}_4$              | 296     | 9,6                                              | —             | 2,54                     | —39         | [211]       |
| $\alpha\text{-MoCl}_4$       | 299,6   | 0,856                                            | —             | $\approx 0,85$           | —           | [212]       |
| $\text{MoCl}_5$              | 305     | 3,80                                             | —             | 1,52                     | 23          | [213]       |
| $\text{MoCl}_5$              | —       | —                                                | 195—293       | $\approx 1,6$            | —           | [10]        |
| $\text{TcCl}_4$              | 306     | 20,5                                             | —             | 3,14                     | 57          | [213]       |
| $\text{RuF}_4$               | —       | —                                                | —291          | 3,04                     | —74         | [214]       |
| $\text{RuF}_5$               | —       | —                                                | 292           | 3,60                     | —           | [214]       |
| $\text{RuO}_2$               | 298     | 1,22                                             | —             | 0,62                     | —           | [161]       |
| $\text{RhF}_4$               | 293     | 2,99                                             | —             | 1,1                      | —           | [193]       |
| $\text{Pd}$                  | 288     | 5,333                                            | 450—1000      | 1,62                     | —228        | [10]        |
| $\text{Pd}$                  | —       | —                                                | >1000         | 1,82                     | —578        | [10]        |
| $\text{PdF}_5$               | 293     | 14,3                                             | —             | 2,05                     | —           | [193]       |
| $\text{CeB}_6$               | 293     | 11,0                                             | 620—1030      | 291                      | —344        | [10]        |
| $\text{CeF}_3$               | 293     | 11,1                                             | 100—293       | 2,51                     | —62         | [10]        |
| $\text{Ce}_2\text{S}_3$      | 292     | 13,5                                             | —             | 2,66                     | —57         | [10]        |
| $\text{CeSn}_3$              | —       | —                                                | —             | 2,8                      | —           | [215]       |
| $\text{Pr}_2\text{O}_3$      | —       | —                                                | —             | 3,59                     | —73         | [215]       |
| $\text{NdB}_6$               | —       | —                                                | 620—1030      | 3,82                     | —455        | [10]        |
| $\text{NdF}_3$               | 293     | 24,7                                             | 153—373       | 3,75                     | —56         | [10]        |
| $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$   | 293     | 15,2                                             | 83—373        | 3,72                     | —49         | [10]        |
| $\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_3$ | 293     | 17,3                                             | 83—373        | 3,69                     | —42         | [10]        |
| —                            | —       | —                                                | 300—673       | 3,47                     | —18         | [10]        |
| $\text{Nd}_2\text{Se}_3$     | —       | >0                                               | —             | 3,58                     | —33         | [10]        |
| $\text{Nd}_2\text{O}_3$      | —       | —                                                | —             | 3,66                     | —27         | [215]       |
| $\text{Sm}_2\text{O}_3$      | 293     | 5,15                                             | —             | 1,50                     | —150        | [10]; [215] |
| $\text{EuBr}_2$              | 292     | 86,2                                             | 90—292        | 7,95                     | 0           | [10]        |
| $\text{EuCl}_2$              | 292     | 119                                              | 90—292        | 7,91                     | 0           | [10]        |
| $\text{Eu}_2\text{O}_3$      | 298     | 28,7                                             | 180—673       | 3,62                     | —135        | [10]        |
| $\text{Eu}_2(\text{SO}_4)_3$ | 293     | 17,6                                             | 293—628       | 3,62                     | —100        | [10]        |
| $\text{GdB}_6$               | —       | —                                                | 623—1033      | 7,63                     | —49         | [10]        |
| $\text{GdC}_2$               | —       | —                                                | 80—300        | 7,95                     | —44         | [10]        |
| $\text{GdH}_2$               | —       | —                                                | 80—300        | 7,83                     | 11          | [10]        |
| $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ | 285,5   | 89,9                                             | 83—700        | 7,92                     | —0,4        | [10]        |
| $\text{GdSn}_3$              | —       | —                                                | —             | 8,0                      | —73         | [215]       |
| $\text{Tb}_2(\text{SO}_4)_3$ | 293     | 129                                              | 293—630       | 9,63                     | —2,3        | [10]        |
| $\text{Er}_2(\text{SO}_4)_3$ | 293—700 | >0                                               | 293—700       | 9,53                     | —10,8       | [10]        |
| $\text{Er}_2\text{Se}_3$     | —       | >0                                               | —             | 9,63                     | —5          | [10]        |

Рис. 26.1. Зависимости  $\chi_{\parallel}$  и  $\chi_{\perp}$  для Be от температуры [183]

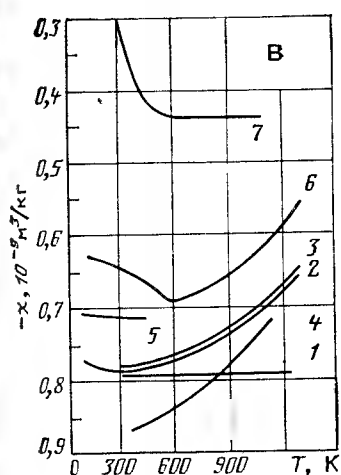


Рис. 26.2. Зависимость удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  от температуры по данным различных работ:

1 —  $\alpha$ -V; 2-5 —  $\beta$ -V; 6, 7 — аморфный V [184]

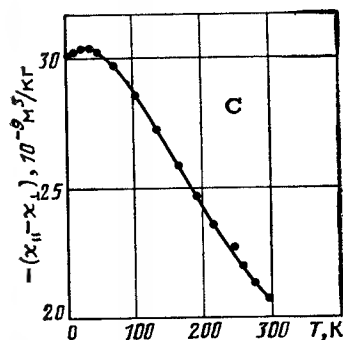


Рис. 26.3. Зависимость  $\chi_i - \chi_{ii}$  для графита от температуры [19]

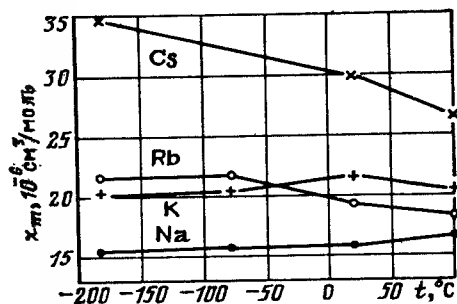


Рис. 26.4. Зависимость  $\chi_m$  для Cs, Rb, Na, K от температуры [185, 186]

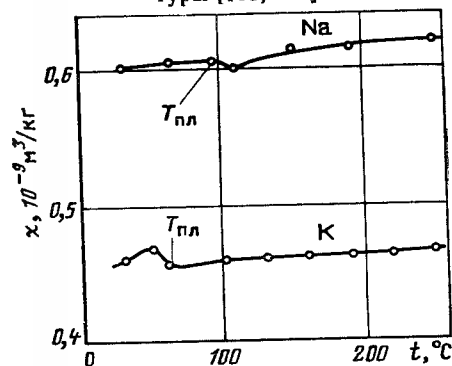


Рис. 26.5. Зависимость  $\chi$  для Na и K от температуры [26, 185]

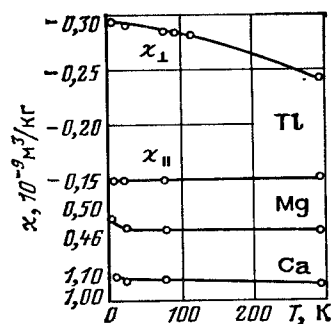


Рис. 26.6. Зависимость  $\chi$  для Ca, Mg, Tl от температуры [33]

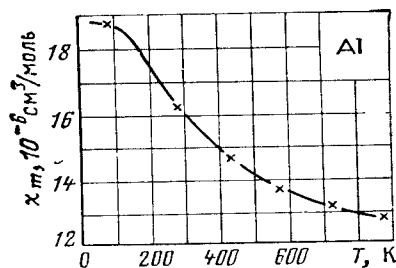


Рис. 26.7. Зависимость  $\chi_m$  для Al от температуры [33]

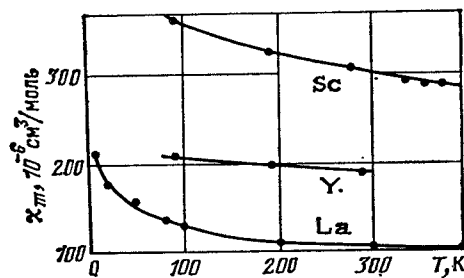


Рис. 26.8. Зависимость  $\chi_m$  для La, Sc, Y от температуры: La [41, 139]; Sc, Y [41, 185]

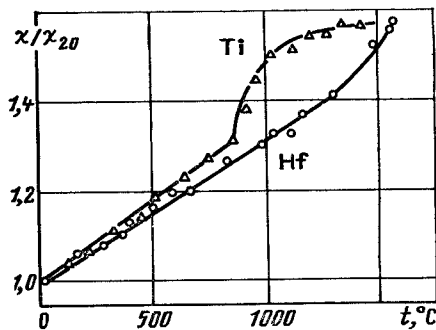


Рис. 26.9. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для Ti, Hf от температуры ( $\chi_{20}$  — восприимчивость при 20°C) [44]

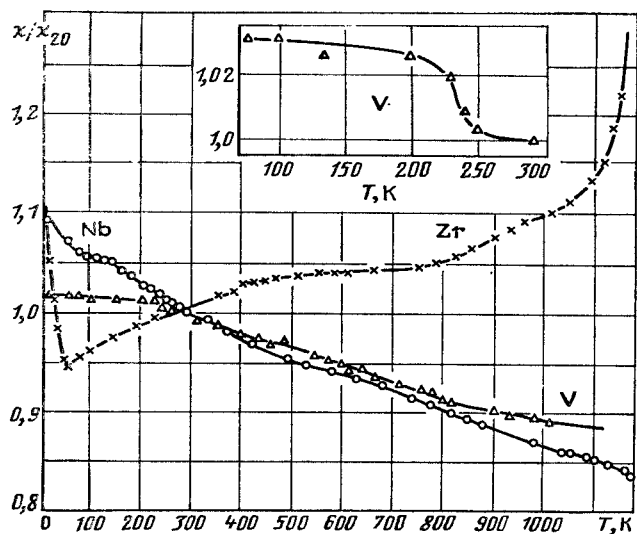


Рис. 26.10. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для V, Zr, Nb от температуры ( $\chi_{20}$ —восприимчивость при 20°C) [57]. На вставке — аномальная зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для V при низких температурах

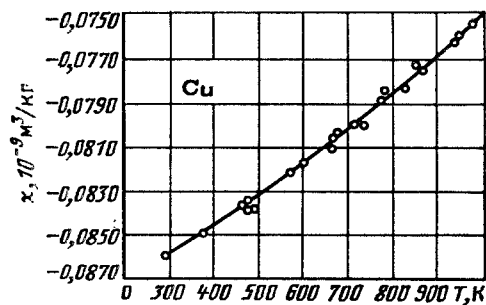


Рис. 26.11. Зависимость  $\chi$  для Cu от температуры [117]

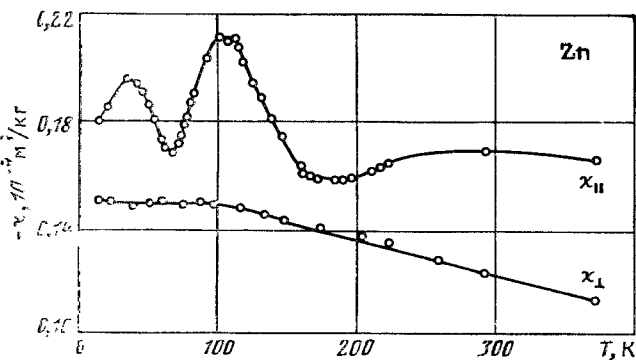


Рис. 26.12. Зависимости  $\chi_{\parallel}$  и  $\chi_{\perp}$  для Zn от температуры [118, 185] ( $H=65,7 \cdot 10^4$  А/м)

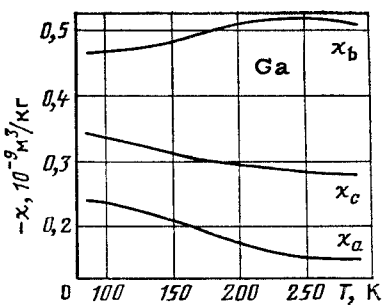


Рис. 26.13. Зависимости  $\chi_a, \chi_b, \chi_c$  для Ga от температуры [187]

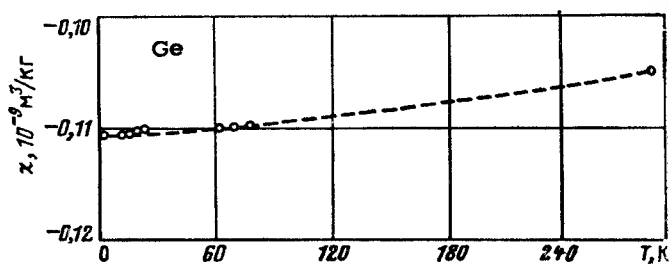


Рис. 26.14. Зависимость  $\chi$  для Ge от температуры. Удельное сопротивление 44—46 Ом·см; концентрация примеси Sb ниже  $10^{14}$  см⁻³ [94]

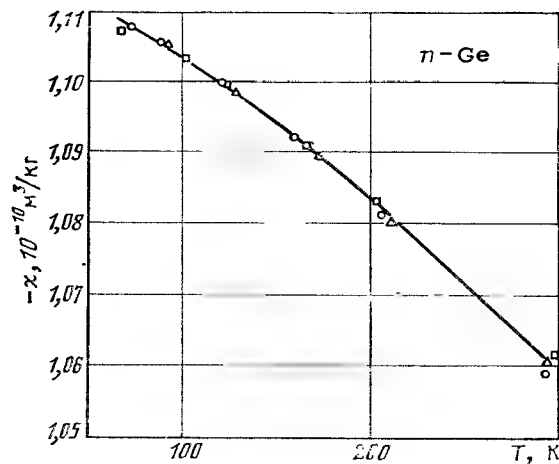


Рис. 26.15. Зависимость  $\chi$  для n-Ge от температуры: Концентрация носителей в образцах: O,  $\Delta$  —  $10^{13}$  см⁻³;  $\square$  —  $10^{14}$  см⁻³ [94, 185]

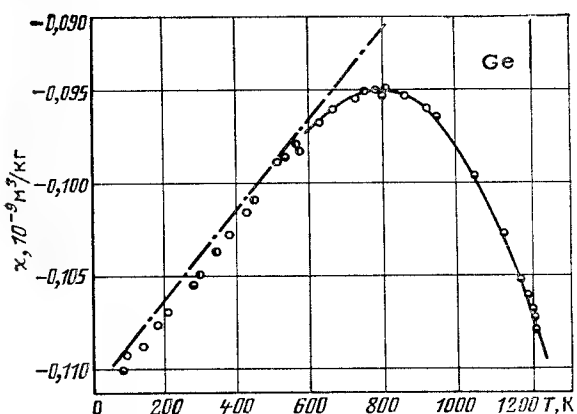


Рис. 26.16. Зависимость  $\chi$  для Ge от температуры [130, 185]

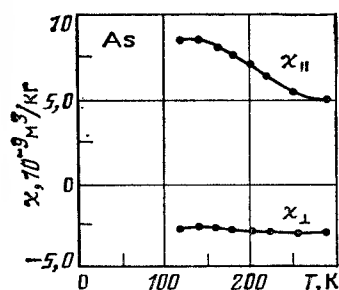


Рис. 26.17. Зависимости  $\chi_{\parallel}$  и  $\chi_{\perp}$  для As от температуры [188]

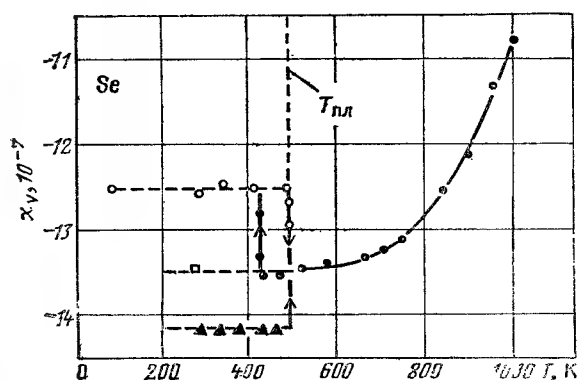


Рис. 26.18. Зависимость  $\chi$  для твердого и жидкого Se от температуры [101]:

○ — гексагональный Se (медленное охлаждение от  $T_{пл}$ ); □ — аморфный (закалка от  $T_{пл}$  до 280 K); ▲ — моноклинный (отпуск при 450 K); ● — жидкий

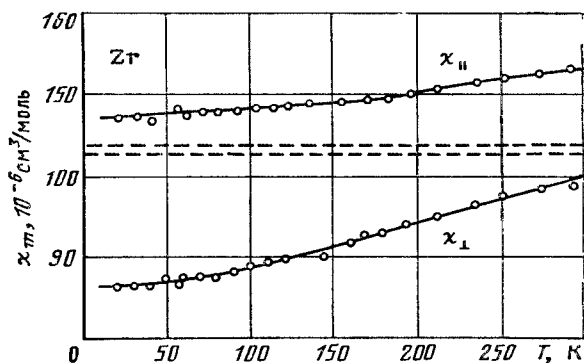


Рис. 26.19. Зависимости  $\chi_{\parallel}$  и  $\chi_{\perp}$  для Zr от температуры [189] ( $H=8,75 \cdot 10^5$  А/м)

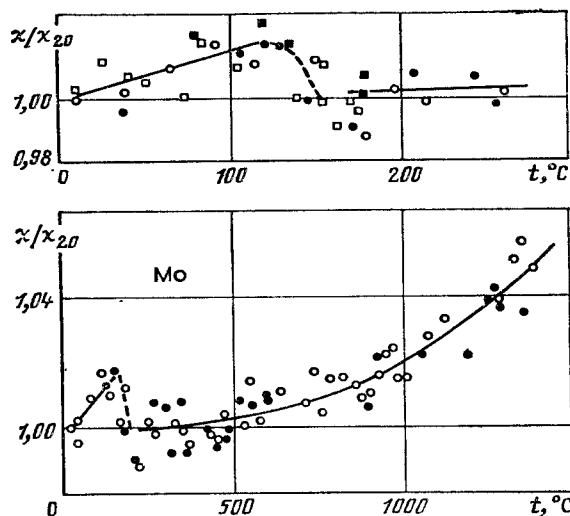


Рис. 26.20. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для Mo от температуры ( $\chi_{20}$  — восприимчивость при 20° C) [44] (точки — разные циклы измерений)

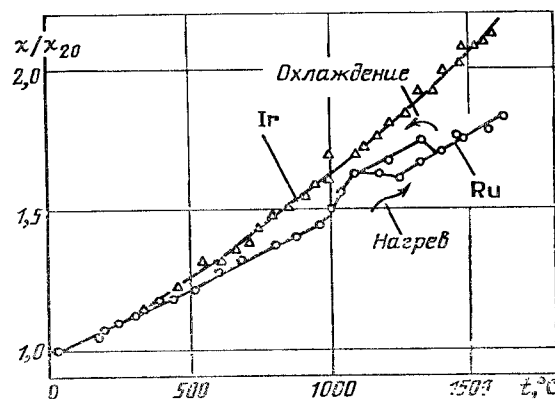


Рис. 26.21. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для Ru и Ir от температуры ( $\chi_{20}$  — восприимчивость при 20° C) [4]

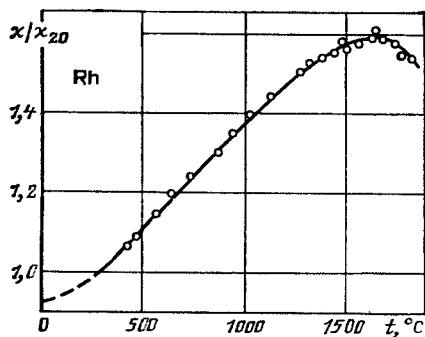


Рис. 26.22 Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для Rh от температуры ( $\chi_{20}$  — восприимчивость при 20°C) [44]

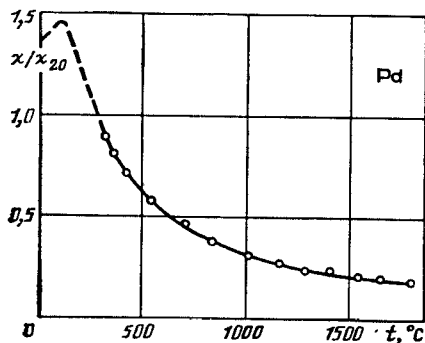


Рис. 26.23. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для Pd от температуры ( $\chi$  — восприимчивость при 20°C) [44]

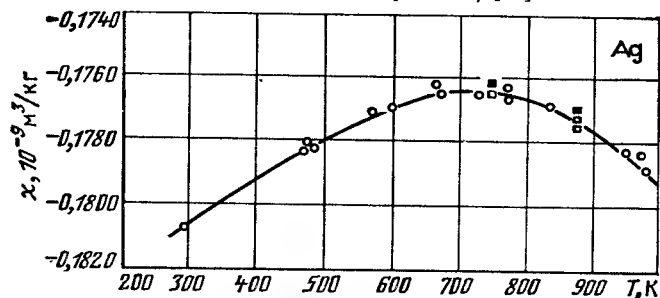


Рис. 26.24. Зависимость  $\chi$  для Ag от температуры [117]:

○ — нормальный образец; ■ — выдержка в течение 12 ч при температуре измерения; □ — обезгаженный образец

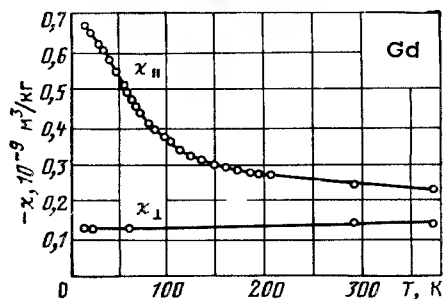


Рис. 26.25. Зависимости  $\chi_{||}$  и  $\chi_{\perp}$  для Cd от температуры [118, 185]

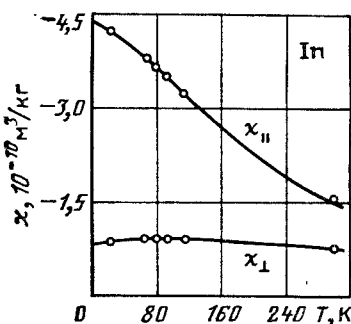


Рис. 26.26. Зависимости  $\chi_{||}$  и  $\chi_{\perp}$  для In от температуры [127]

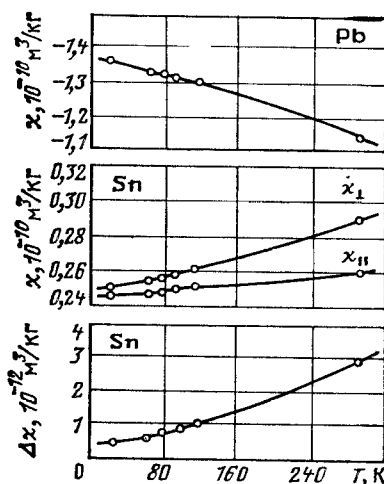


Рис. 26.27. Зависимости  $\chi$  для Sn и Pb и  $\Delta\chi = \chi_{\perp} - \chi_{||}$  для Sn от температуры [127]

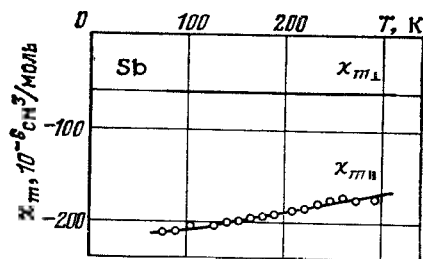


Рис. 26.28. Зависимости  $\chi_{м||}$  и  $\chi_{м\perp}$  для Sb от температуры [190]

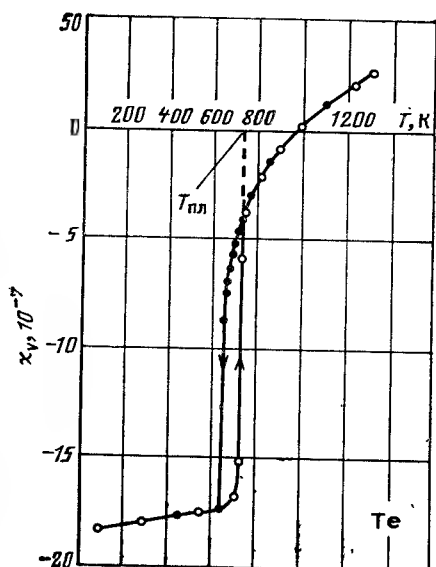


Рис. 26.29. Зависимость  $\chi_v$  для твердого и жидкого Te от температуры [101]:  
○ — нагрев; ● — охлаждение

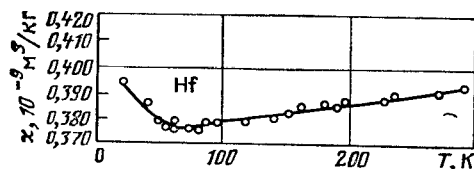


Рис. 26.30. Зависимость  $\chi$  для Hf от температуры [142]

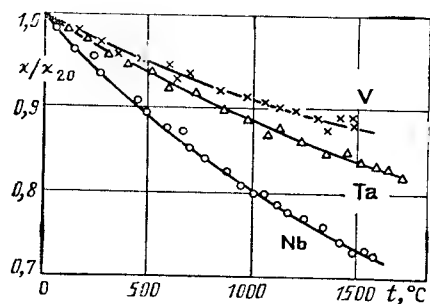


Рис. 26.31. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для V, Ta, Nb от температуры ( $\chi_{20}$  — восприимчивость при 20°C) [44]

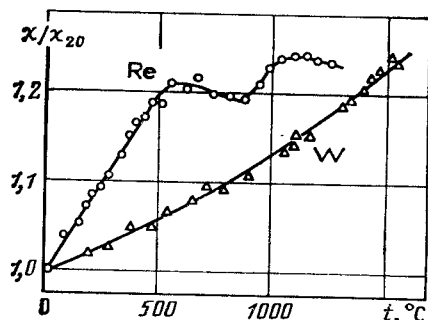


Рис. 26.32. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для Re и W от температуры ( $\chi_{20}$  — восприимчивость при 20°C) [44]

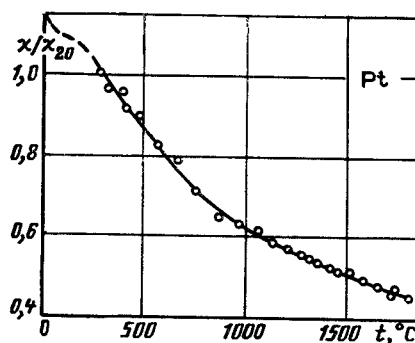


Рис. 26.33. Зависимость  $\chi/\chi_{20}$  для Pt от температуры ( $\chi_{20}$  — восприимчивость при 20°C) [44]

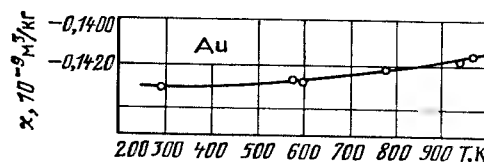


Рис. 26.34. Зависимость  $\chi$  для Au от температуры [117]

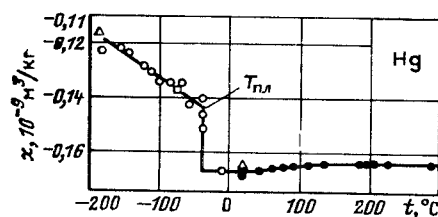


Рис. 26.35. Зависимость  $\chi$  для Hg от температуры [185]:  
○, △, □, ● — данные разных авторов

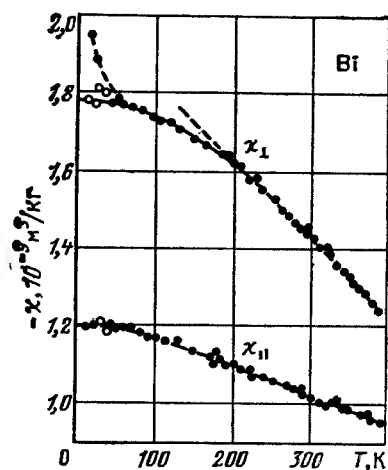


Рис. 26.36. Зависимости  $\chi_{||}$  и  $\chi_{\perp}$  для Bi от температуры [185]



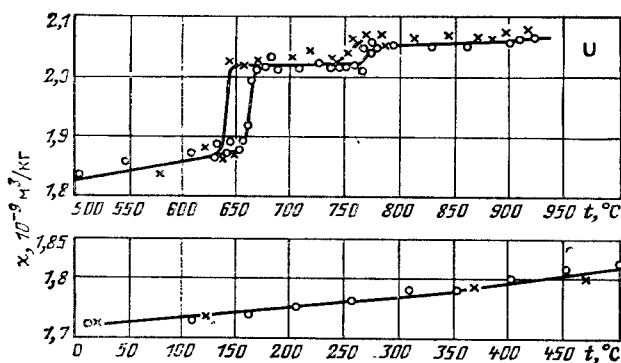


Рис. 26.37. Зависимость  $\chi$  для U от температуры [176, 185]:

○ — нагрев; × — охлаждение

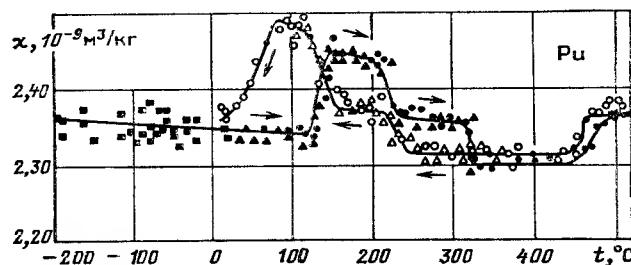


Рис. 26.38. Зависимость  $\chi$  для Pu от температуры [181, 185]:

▲, ● — измерения при нагреве; △, ○ — при охлаждении;  
■ — при низких температурах

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CRC Handbook of Chemistry and Physics. Ed. 63<sup>rd</sup>. 1982—1983.
2. Havens G.//Phys. Rev. 1933. Vol. 43. P. 992—998.
3. Onnes H. K., Perrier A.//Proc. Acad. Sci. Amsterdam. 1911. Vol. 14. P. 115—122.
4. Kido K.//Sci. Repts. Tôhoku Univ. 1932. Vol. 21. P. 149—151, 288—289, 869—872.
5. Ehrlich P.//Z. Anorgan. und allgem. Chem. 1942. Bd. 249. S. 219—224.
6. Cabrera B., Fahlenbrach H.//Ann. Soc. Espan. Fôs. Quim. 1934. Vol. 32. P. 525—537.
7. Meyer St.//Phys. Z. 1925. Bd. 26. S. 51—54.
8. Witmer E. E.//Phys. Rev. 1942. Vol. 61. P. 387—392.
9. Collings E. W.//J. Phys. Chem. Solids. 1965. Vol. 26. P. 949—954.
10. Foëx G. Tables de Constantes et Données Numériques 7. Constantes Sélectionnées Diamagnétisme et Paramagnétisme. Paris. 1957.
11. Веркин Б. И., Дмитренко И. М., Свечкарев И. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. С. 670—675.
12. Owen M.//Ann. Phys. 1912. Bd. 37. S. 657.
13. Klemm L.//Z. Elektrochem. 1939. Bd. 45. S. 354—357.
14. Honda K.//Ann. Phys. 1910. Vol. 32. P. 1003—1063.
15. Soloviev N. E., Makarov V. S., Ugai Ya. A. e. a.//J. Less-Common. Met. 1979. Vol. 67. P. 161—164.

16. Kubler L., Gewinner G., Koulmann e. a.//Phys. Stat. Solidi (b). 1975. Vol. 69. P. 323—328.
17. Hudgens S., Kastner M., Fritzsche H.//Phys. Rev. Lett. 1972. Vol. 33. P. 1552—1554.
18. De Haas W., van Alphen P. M.//Proc. Konink. Nederl. Acad. Wet. Amsterdam. 1933. Vol. 36. P. 263—270.
19. Maurouli A., Flandorois S., Coulon C. e. a.//J. Phys. Chem. Sol. 1982. Vol. 43. P. 1103—1109.
20. Pascal P.//Compt. rend. 1908. Vol. 147. P. 56—58, 242—244, 742—744; 1910. Vol. 150. P. 1167—1169; Ann. chimie et de phys. 1910. Vol. 19. P. 5—70.
21. Pascal P.//Compt. rend. Paris. 1909. Vol. 148. P. 413—415.
22. Jousot-Dubien J., Lemanceau B., Pacault A.//J. Chim. Phys. 1956. Vol. 53. P. 198—205.
23. Bitter F.//Phys. Rev. 1930. Vol. 35. P. 1572—1577.
24. De Fotis G. C.//Phys. Rev. B. 1981. Vol. 23. P. 4714—4740.
25. Laine P. Compt. rend. 1933. Vol. 196. P. 910—913.
26. Venskateswarlu K., Sriraman S.//Z. Naturforsch. 1958. Bd. 13a. S. 445—451.
27. Prasad M., Kanekar C. R., Kamat L. S.//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 686—689.
28. Ishiura T.//Sci. Repts. Tôhoku Univ. Ser. I. 1914. Vol. 3. P. 303—319; 1916. Vol. 5. P. 53—61; 1920. Vol. 9. P. 233—240.
29. Meslin J.//Ann. chimie et de phys. 1906. Vol. 7. P. 145—194.
30. Pascal P.//Compt. rend. 1921. Vol. 173. P. 144—146, 712—714; 1922. Vol. 174. P. 457—460, 1698—1700; 1923. Vol. 175. P. 1063—1065.
31. Klemm W., Sodomann H., Langmesser P.//Z. Anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd. 241. S. 281—304.
32. Thomas J. G., Mendoza E.//Philos. Mag. 1951. Vol. 43. P. 900—906.
33. Веркин Б. И., Свечкарев И. В.//Укр. физ. журн. 1962. Т. 7, № 3. С. 322—325.
34. Wilson J.//Proc. Roy. Soc. 1921. Vol. A98. P. 274—278; 1923. Vol. 103. P. 185—189.
35. Das D.//Indian J. Phys. 1967. Vol. 41. P. 525—532.
36. Pascal P.//Compt. rend. 1913. Vol. 156. P. 323—327; 1914. Vol. 158. P. 37—38.
37. Суворова Л. Н., Байдаков Л. А.//Изв. АН СССР. Геогр. мат. 1977. Т. 13. С. 806—810.
38. Nilakantan P.//Proc. Indian Acad. Sci. (A). 1936. Vol. 4. P. 419—422.
39. Pascal P. Compt. rend. 1923. Vol. 176. P. 1887—1888; 1923. Vol. 177. P. 765—768.
40. Eudo H.//Sci. Repts. Tôhoku Univ. Ser. 1. 1925. Vol. 14. P. 479—512.
41. Bormmer H.//Z. Elektrochem. 1939. Bd. 45. S. 357—362.
42. Volkenshtein N. V., Goloshina E. V., Kost M. E. e. a.//Phys. Stat. Sol. (b). 1983. Vol. 117. P. K47—K49.
43. Wedekind E.//J. Angew. Chemie. 1924. Bd. 37. S. 87—88.
44. Kojima H., Tebble R. S., Williams D. E. G.//Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1961. Vol. 250. P. 237—250.
45. Reckie J., Yao Y. L.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1956. Vol. B69. P. 417—431.
46. Münster A., Lagel K.//Z. Physik. 1956. Bd. 144. S. 130—145.
47. Gervais D., Basso-Bert M., Choukroum R. e. a.//C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. C. 1969. Vol. 269. P. 257—260.
48. Klemm W., Schüth W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1931. Bd. 201. S. 24—31.

49. Васильев Ю. В., Хрищева Д. Д., Ария С. М.// Журн. неорг. химии. 1963. Т. 8. С. 785—789.
50. Rüdorff W., Luginsland H. H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1964. Bd 334. S. 125—132.
51. Wedekind E., Horst C.//Ber. chem. Ges. 1912. Bd. 45. S. 262—270; 1915. Bd 48. S. 105—112.
52. Scott B. A., Eulenberger G. R., Bernheim R. A., J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. P. 263—268.
53. Conroy L. E., Park K. C.//Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 459—467.
54. Naakon H., Kjekshug A., Rost E. e. a.//Acta. Chem. Scand. 1963. Vol. 17. P. 1283—1289.
55. Радовский И. З., Рабинович Б. С., Сидоренко Ф. А. и др.//Тр. Уральского политехн. ин-та. 1970. Т. 186. С. 155—157.
56. Robins D. A.//Philos. Mag. 1958. Vol. 3. P. 313—327.
57. Suzuki H., Miyahara S.//Phys. Soc. Japan. 1965. Vol. 20. P. 2102—2108.
58. Kriessman C. J.//Rev. Modern. Phys. 1953. Vol. 25. P. 122—126; Phys. Rev. 1954. Vol. 9. P. 837—844.
59. Whitteker A. G., Yost Don M.//J. Amer. Chem. Soc. 1949. Vol. 71. P. 3135—3137.
60. Roch J.//Compt. rend. 1959. Vol. 249. P. 56—65.
61. Gervais D., Choukroun R.//J. Inorg. Chem. 1974. Vol. 36. P. 3679—3687.
62. Clogston A. M., Gossard A. C., Jaccarino V. e. a.//Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 9. P. 262—266.
63. Рыкова М. А., Сабирзянов А. В., Загряжский В. А. и др.//Тр. Уральского политехн. ин-та. 1970. Т. 186. С. 37—40.
64. Сидоренко Ф. А., Радовский И. З., Зеленин Л. П. и др.//Порошковая металлургия. 1966. № 9. С. 68—74.
65. Tilk W., Klemm W.//Z. Anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd 240. S. 355—368.
66. Bartecki A., Wajda S.//Proc. Symp. Wroclaw, 1962. 1964. P. 305.
67. Stein B. F., Walmsley R. H.//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 933—940.
68. Gambino R. J., Mc Guire T. R., Nakamura Y.//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 1253—1255.
69. Радовский И. З., Шубина Т. С., Гельд П. В. и др.//Порошковая металлургия. 1965. № 2. С. 33—40.
70. Радовский И. З., Бортник А. Н.//Тр. Уральского политехн. ин-та. 1968. Т. 167. С. 120—122.
71. Гельд П. В., Сидоренко Ф. А. Силициды переходных металлов четвертого периода. М.: Металлургия, 1971.
72. Levinson L. M.//J. Solid State Chem. 1973. Vol. 6. P. 126—135.
73. Holseth H., Kjekshug A.//J. Less-Common Metals. 1968. Vol. 16. P. 472—481.
74. Boda G., Stenstrom B., Lugredo V. e. a.//Phys. Ser. 1971. Vol. 4. P. 132—137.
75. Miyahara S., Teranishi T.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 896—899.
76. Shinoda D., Asanabe S. T.//J. Phys. Soc. Japan. 1966. Vol. 21. P. 555—561.
77. Nahigian H., Steger J., Mc Kinzie H. L. e. a.//Inorg. Chem. 1974. Vol. 13. P. 1498—1507.
78. Heidelberg R. F., Luxem A. H., Talhouk S.//Inorg. Chem. 1966. Vol. 5. P. 194—198.
79. Фролов А. А., Сидоренко Ф. А., Кренцис Р. П.//Тр. Уральского политехн. ин-та. 1970. Т. 186. С. 18—21.
80. Jaccarino V., Wertheim G. K., Wernick J. R. e. a.//Phys. Rev. 1967. Vol. 163. P. 476—480.
81. Badger E. H. M., Griffith R. H., Newling W. B. S.//Proc. Roy. Soc. 1949. Vol. A 197. P. 193.
82. Сидоренко Ф. А., Мирошников Л. А., Гельд П. В.//Изв. вузов. Физика. 1969. № 5. С. 114—117.
83. Czanderna A. W.//J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45. P. 3159—3167.
84. Adou J. J., Baudet J.//J. chim. phys. 1967. Vol. 64. P. 1540—1547.
85. Gautier F., Krill G., Panissod P. e. a.//J. Phys. C. 1974. Vol. 7. P. L170—L172.
86. Klemm W., Schüth W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1931. Bd. 203. S. 104—108.
87. Bither T. A., Bouchard R. J., Cloud W. H. e. a.//Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 2208—2217.
88. Mac Clure J. W., Marcus J. A.//Phys. Rev. 1951. Vol. 84. P. 787—788.
89. Зюбина Т. А., Торонцев В. П., Торонцев Ю. П. и др.//Изв. АН СССР. Неорг. материалы 1977. Т. 13. С. 355—357.
90. Pankey T.//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. P. 1802—1806.
91. Рустамов П., Алиев О. М., Курбанов Т. Х. и др.//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1977. Т. 13. С. 1748—1751.
92. Busch G. A. Kern R.//Helv. Phys. Acta. 1959. Vol. 32. P. 24—57.
93. Довлетов К., Мархуда Ю. А., Аникин А. В. и др.//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1978. Т. 14. С. 33—35.
94. Van Itterbeek A., Duchateau W.//Physica. 1956. Vol. 22. P. 649—656; 1957. Vol. 23. P. 169—172.
95. Hedgcock F. T.//J. Electronics. 1957. Vol. 2. P. 513—515.
96. Bowes R.//Phys. Rev. 1957. Vol. 108. P. 683—689.
97. Stevens D. K., Cleland J., Crawford L. H. e. a.//Ibid. 1955. Vol. 100. P. 1084—1093.
98. Geist D.//Z. Physik. 1959. Bd. 157. S. 335—361; 490—498.
99. Bennett S., Heyding R. D.//J. Phys. Chem. Solids. 1966. Vol. 27. P. 471—477.
100. Badley B. G., Disalvo F. J., Warszczak J. V.//Solid State Commun. 1972. Vol. 11. P. 89—91.
101. Busch G., Risi M., Uuan S.//Helv. phys. acta. 1960. Vol. 33. P. 1002—1013.
102. Honda K., Ishiware T.//Sci. Repts Tōnoku Univ. 1915. Vol. 4. P. 215—260.
103. Rao S. R., Sovithri K.//Proc. Indian Sci. 1941. Vol. 14A. P. 584—592.
104. De Monsabert W. R., Boudreaux E. A.//Phys. Chem. 1958. Vol. 62. P. 1422—1428.
105. Juza R., Rabenau A., Nitgshke J.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1964. Bd. 332. S. 1—9.
106. Trzebiatowski W., Stalinski B.//Bull. Acad. polon. sci. Cl. 1953. Vol. 1. P. 317—318.
107. Горцева Ф. П., Дидченко Р. Неорг. химия. 1965. Т. 4. С. 182—184.
108. Khan H. R., Raub C. J., Gardner W. E. e. a.//Mater. Res. Bull. 1974. Vol. 9. P. 1129—1130.
109. Klemm W., Yacobi H., Tilk W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1931. Bd. 201. S. 1—23.
110. Fendins H.//Dissert. Hannover, 1931.
111. Morette A.//Compt. rend. 1942. Vol. 215. P. 86—88.
112. Nelson C. M., Boyd R. E., Smith Wm T.//J. Amer. Chem. Soc. 1954. Vol. 76. P. 348—352.
113. Fletcher J. M., Gardner W. R., Greenfield B. F. e. a.//J. Chem. Soc. (A) 1968. Vol. 1968. P. 653—659.
114. Fletcher J. M., Gardner W. E., Hooper E. W. e. a.//Nature. 1963. Vol. 199. P. 1039—1095.
115. Hoare F. L., Matthews J. C.//Proc. Roy. Soc. 1952. Vol. A212. P. 137—148.
116. Papatheodorou G. N.//Inorg. Nucl. Chem. Lett. 1974. Vol. 10. P. 115—117.

117. Garber M., Henry W. G., Hoeve H. G.//Canad. J. Phys. 1960. Vol. 38. P. 1595—1603.
118. Marcus J. A.//Phys. Rev. 1949. Vol. 76. P. 413—416, 621—627.
119. Mookherji T.//J. Electrochem Soc. 1970. Vol. 117. P. 1201—1204.
120. Страхов Л. П., Римадханов К., Королев В. В.//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1973. Т. 9. С. 645—647.
121. Singh S., Singh P.//J. Phys. Chem. Sol. 1980. Vol. 41. P. 135—139.
122. Пилат И. М.//Физика металлов и металловедение. 1957. Т. 4. С. 232—238.
123. Страхов Л. П., Крепкая В. П., Казеннов Б. А.//Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 3595—3597.
124. Потыкевич И. В., Бондарь Г. И., Коваль В. С. и др.//Укр. физ. журн. 1983. Т. 28. С. 1072—1076.
125. Сирота Н. Н., Виткина Ц. З., Антюков А. М. и др.//Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. 1976. № 2. С. 126—128.
126. Verharghe H., Vandermeerssche G., Le Conep-te C.//Phys. Rev. 1959. Vol. 80. P. 758—764.
127. Александров Б. Н., Веркин Б. И., Свечкарев И. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 39. С. 37—40.
128. Busch G., Menth A., Natterer B.//Z. Naturforsch. 1964. Bd. 19a, S. 542—551.
129. Juza R., Hahn H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1940. Bd. 244. S. 111—124.
130. Busch G., Kern R.//Helv. phys. acta. 1959. Vol. 32. P. 24—29.
131. Stevens D. K., Crawford J. H.//Phys. Rev. 1955. Vol. 99. P. 487—488.
132. Darnell A. J., Libby W. F.//Ibid. 1964. Vol. A135. P. 1453—1459.
133. Broniewski W., Franczek S., Witkowski R.//Ann. Phys. 1938. Vol. 10. P. 5—19.
134. Endô H.//Sci. Repts. Tôhoku Univ. 1927. Vol. 16. P. 201—234.
135. Matyás M.//Czechoslov. J. Phys. 1958. Vol. 8. P. 301—308.
136. De Haas W. J., van Alphen P. M.//Acad. Sci. (Amsterdam). 1933. Vol. 36. P. 158—169.
137. Rao S. R., Venkataramiah H. S.//J. Mysore Univ. B. 1948. Vol. 8, № 2. P. 39—46.
138. Lane C. T.//Phys. Rev. 1933. Vol. 44. P. 43—45.
139. Lock J. M.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1957. Vol. B70. P. 476—479, 566—571.
140. Klemm W., Meisel K., von Vogel H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1930. Bd. 190. S. 123—144.
141. Kreissman C. J., McCuire T. R.//Phys. Rev. 1955. Vol. 98. P. 936—937.
142. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18. С. 784—788.
143. Hall J. R., Marchant N. K., Plowman R. A.//Australian J. Chemie. 1963. Vol. 16. P. 34—38.
144. Schäfer H., Gerken R., Scholz H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1965. Bd. 335. S. 96—103.
145. Brauer G., Weidlein J., Strähle J.//Ibid. 1966. Vol. 348. P. 298—307.
146. Крылов Е. И.//Журн. неорг. химии. 1958. Т. 3. С. 1487—1489.
147. McCarley R. E., Brown T. M.//Inorg. Chem. 1964. Vol. 3. P. 1232—1236.
148. Fendins H.//Dissert., Hannover, 1931.
149. Gibart P.//Compt. rend. 1964. Vol. 259. P. 4237—4241.
150. Biltz W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1930. Bd. 214. S. 227—236.
151. Greiner J. D., Shanks H. R.//J. Solid State Chem. 1972. Vol. 5. P. 262—266.
152. Cheretien A., Odent G.//Compt. rend. 1963. Vol. 257. P. 2290—2295.
153. Thaore K.//Bull. Soc. chim. France. 1965. P. 1284.
154. Белова В. И., Семенов И. Н.//Журн. неорг. химии, 1971. Т. 16. С. 2871—2875.
155. Machmer P.//Z. Naturforsch. 1969. Vol. 24B. P. 200—208.
156. Schüber H., Huneke K. H., Brendel C.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1971. Bd. 383. S. 49—56.
157. Белова В. И., Сыркин Ю. К.//Журн. неорг. химии, 1958. Т. 3. С. 2016—2021.
158. Колбин Н. И., Самойлов В. М.//Журн. неорг. химии, 1968. Т. 13. С. 906—909.
159. Brodersen K., Machmer P.//Naturforsch. 1962. Bd. 176. S. 127—133.
160. Ryden W. D., Lawson A. W.//J. Chem. Phys. 1970. Vol. 52. P. 6058—6064.
161. Gouthrie A. N., Bourland L. T.//Phys. Rev. 1931. Vol. 37. P. 303—308.
162. Brodersen K., Thiele G., Schnering H. G.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1965. Bd. 337. S. 120—128.
163. Argue G. R., Banewicz J. J.//Inorg. Nucl. Chem. 1963. Vol. 25. P. 923—927.
164. Gronvold F., Haraldsen H., Kjekshus A.//Acta Chem. Scand. 1960. Vol. 14. P. 1879—1886.
165. Rao S. R., Sriraman S.//Proc. Indian Acad. Sci. 1937. Vol. 5A. P. 343—350.
166. Vogt E.//Ann. Phys. 1932. Bd. 14. S. 1—39.
167. Bates L. F., Baker C. I. W.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1938. Vol. 50. P. 409—412.
168. Rao S. R., Narayanaswamy A. S.//Philos. Mag. 1938. Vol. 26. P. 1018—1030.
169. Pascal P., Minne P.//Compt. rend. 1931. Vol. 193. P. 1303—1305.
170. Mikhail H., Mekawy J.//Czech. J. Phys. 1978. Vol. B28. P. 216—222.
171. Shoenberg D., Uddin M. Z.//Proc. Roy. Soc. 1936. Vol. A156. P. 687—701.
172. Kapitza P.//Proc. Roy. Soc. 1931. Vol. A131. P. 224—273.
173. Rao S. R. J.//J. Mysore Univ. B. 1945. Vol. 5. № 2. P. 69—77.
174. Smith J. F., Greiner J. D.//Phys. Rev. 1959. Vol. 115. P. 884—891.
175. Trzebiatowski W., Selwood P. W.//J. Amer. Chem. Soc. 1950. Vol. 72. P. 4501—4506.
176. Bates L. F., Hughes D.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1954. Vol. B67. P. 28—37.
177. Henkel P., Klemm W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1935. Bd. 222. S. 70—72.
178. Picon M., Flahaut J.//Compt. rend. 1953. Vol. 237. P. 1160—1162.
179. Picon M., Flahaut J.//Ibid. 1955. Vol. 240. P. 784—785.
180. Khodadad P.//Ibid. 1958. Vol. 247. P. 1205—1209.
181. Brodsky M. B.//Inst. Phys. Lond. 1971. Conference Didest Rare Earth and Actinides. № 3. P. 75—83.
182. Seguin M.//Ibid. 1958. Vol. 246. P. 3243—3246.
183. Гречнев Г. Е., Свечкарев И. В., Середа Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1978. Т. 75. С. 993—998.
184. Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series. Group III. Vol. 17e. P. 284.
185. Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen. Ed. 6-th, 1962. Bd. II, 9 teil.
186. Böhm B., Klemm W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd. 243. S. 69—85.
187. Marchand A.//Compt. rend. 1955. Vol. 241. P. 468—470.

188. Yamaguchi Y.//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 833—835.
189. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В., Щеголихина Н. И.//Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25. С. 180—185.
190. Browne S. H., Lane C. T.//Phys. Rev. 1941. Vol. 60. P. 895—899.
191. Klemm W., Hoeschek E.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1936. Bd. 226. S. 359—369.
192. Clark J. K., Machin D. J.//J. Chem. Soc. 1963. P. 4430—4437.
193. Nyholm R. S., Sharpe A. G.//J. Chem. Soc. 1952. P. 3579—3587.
194. Juza D., Giegling D., Schäber H.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1969. Bd. 366. S. 121—130.
195. Воробьев Н. И., Печковский В. В., Кобец Л. В.//Журн. неорг. химии. 1974. Т. 19. С. 3—6.
196. Cadeville M. C.//J. Phys. Chem. Sol. 1966. Vol. 27. P. 667—674.
197. Проскурников А. А., Крылов Е. И.//Журн. неорг. химии. 1965. Т. 10. С. 1017—1021.
198. Hume D. N., Stone H. W.//J. Amer. Chem. Soc. 1941. Vol. 63. P. 1200—1209.
199. Hoppe R., Daehne W., Klemm W.//Ann. Chem. 1962. Vol. 658. P. 1—14.
200. Zernicke J.//Rec. Trav. Chim. 1953. Vol. 72. P. 390—397.
201. Williams E. H.//Phys. Rev. 1926. Vol. 28. P. 167—173.
202. Haraldsen H., Grönvold F., Hurlen T.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1956. Bd. 283. S. 143—164.
203. Furuseth S., Kjekshus A., Andersen A. F.//Acta Chem. Scand. 1969. Vol. 23. P. 2325—2329.
204. Vandenbempt E., Pauwels L., de Clippeleir K.//Bull. Soc. Chim. Belg. 1981. Vol. 80. P. 283.
205. Uchida E., Kondoh H.//J. Phys. Soc. Japan. 1955. Vol. 11. P. 21—28.
206. Munson R. A., de Sorbo W., Koubel J. S.//J. Chem. Phys. 1967. Vol. 47. P. 1769—1784.
207. Lewig J., Machin D. J., Newnham I. E. e. a.//J. Chem. Soc. 1962. № 11. P. 2036—2044.
208. Ehrlich P., Plöger F., Pietzka G.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1955. Vol. 282. S. 19—27.
209. Rudolf W., Luginsland H. H.//Ibid. 1964. Bd. 334. S. 125—138.
210. Klemm W., Steinberg H.//Ibid. 1936. Bd. 227. S. 193—213.
211. Schäfer H., v. Schnering H. G., Tillack J.//Ibid. 1967. Bd. 353. S. 281—297.
212. Kepert D. L., Mandyszewsky R.//Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 2091—2098.
213. Knox K., Coffey G. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1959. Vol. 81. P. 5—13.
214. Holloway J. H., Peacock R. D.//J. Chem. Soc. 1963. P. 3892—3898.
215. Тейлор К., Дарби М.//Физика редкоземельных соединений/Пер. с англ. М.: Мир. 1974.
216. Brown D. A., Glass W. K., O'Daly C.//J. Chem. Soc. Dalton. Trans. 1973. № 12. P. 1311—1315.
217. Brisdon B. L., Edwards D. A., Machin D. J.//J. Chem. Soc. (A). 1967. P. 1825—1829.
218. Perakis N.//J. Phys. Radium. 1954. Vol. 15. P. 191.
219. Brown D., Colton R.//J. Chem. Soc. 1964. P. 714—717.
220. Schüth W., Klenum W.//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1934. Bd. 220. S. 193—198.
221. Colton R., Farthing R. H.//Australian J. Chem. 1968. Vol. 21. P. 589—597.
222. Hargreaves G. B., Peacock R. D.//J. Chem. Soc. 1960. № 11. P. 2618—2626.
223. Hargreaves G. B., Peacock R. D.//Proc. Chem. Soc. 1959. № 1. P. 85—89.
224. Glemser O., Roesky H. W., Hellberg K. H. e. a.//Chem. Ber. 1966. Bd. 99. S. 2652—2663.
225. Bose D. M., Bhar H. G.//Z. Physik. 1928. Bd. 48. S. 716—721.
226. Figgis B. N., Lewis J., Mabbs F. E.//J. Chem. Soc. 1961. P. 3138—3147.
227. Nast R., Hoerl W.//Chem. Ber. 1962. Bd. 95. S. 1470—1475.

## Глава 27

# МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К. Г. Гуртовой

## 27.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Вещества, обладающие спонтанным магнитным моментом, т. е. имеющие конечную намагниченность при достаточно низкой температуре и нулевом внешнем магнитном поле, называются ферромагнетиками в широком смысле слова. При этом упорядочение спиновых и орбитальных моментов электронов в этих веществах не обязательно имеет простой характер (см. структуры «Конус» и «Ферри» на рис. 27.16). Для ферромагнетиков характерны зависимости магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля и предыстории образца, а также существование температуры, выше которой вещество переходит в парамагнитное состояние с нулевым спонтанным магнитным моментом.

**Намагниченность и магнитная индукция.** Магнитный момент единицы объема магнетика называют намагниченностью. Намагниченность  $J$ , А/м, магнитная индукция  $B$ , Тл, и напряженность магнитного поля  $H$ , А/м, связаны известным соотношением:

$$B = \mu_0 (H + J),$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Если эллипсоидальный образец магнетика находится во внешнем магнитном поле  $H$ , то поле внутри образца  $H_i$  определяется формулой

$$H_i = H - \hat{N} J,$$

где  $\hat{N}$  — тензор размагничивающих коэффициентов (факторов).

В ферромагнетиках намагничивание из состояния с нулевой индукцией изображается кривой намагничивания  $OA$  (или  $OA'$ ) (рис. 27.1), описывающей зависимость магнитной индукции (или намагниченности) от  $H$ . Намагниченность с ростом поля достигает предела  $J_s$ , называемого намагниченностью насыщения. При перемагничивании зависимость  $B(H)$  [или  $J(H)$ ] образует характерную S-образную кривую — петлю гистерезиса

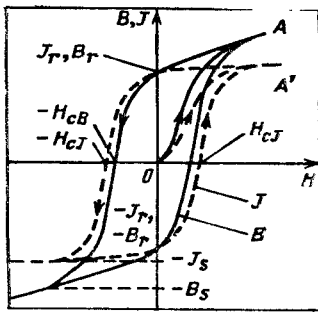


Рис. 27.1. Зависимости магнитной индукции  $B$  и намагниченности  $J$  ферромагнитного материала от напряженности поля  $H$

(рис. 27.1). Точки пересечения петли гистерезиса с осями ординат и абсцисс дают значения соответственно остаточной индукции  $B_r$  (или остаточной намагниченности  $J_r$ ) и коэрцитивной силы  $H_{cB}$  (или  $H_{cJ}$ ).

Часто для описания магнетиков используют удельный магнитный момент (иначе удельную намагниченность)  $\sigma$ , т. е. магнитный момент единицы массы. Единица удельного магнитного момента в СИ —  $A \cdot m^2/kg$ , в системе СГСМ —  $Gc \cdot cm^3/g$  (в англоязычной литературе —  $emu/g$ ). Иногда в качестве магнитной характеристики приводят атомный магнитный момент  $\mu$ , т. е. средний магнитный момент, приходящийся на атом или на формульную единицу вещества; его измеряют в магнетонах Бора  $\mu_B$ . Удельный и атомный магнитные моменты связаны с соотношением

$$\mu = (M/N_A \mu_B) \sigma,$$

где  $M$  — молярная масса, соответствующая формульной единице вещества,  $kg \cdot mol^{-1}$ ;  $N_A$  — постоянная Авогадро,  $mol^{-1}$ .

**Точка Кюри и точка компенсации.** Температура  $T_c$ , при которой магнетик переходит из ферромагнитного в парамагнитное состояние, называется температурой или точкой Кюри. В некоторых интерметаллидах со сложной магнитной структурой при так называемой температуре компенсации  $T_{ком}$  спонтанная намагниченность обращается в нуль вследствие компенсации составляющих ее намагниченностей магнитных подрешеток.

**Магнитная восприимчивость и проницаемость.** Зависимость  $J$  от  $H$  представляется в виде  $J = \chi H$ , где  $\chi$  — магнитная восприимчивость (объемная), а зависимость  $B$  от  $H$  принято записывать в виде  $B = \mu_a H$ , где  $\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость,  $Gn/m$ . Таким образом, восприимчивость и проницаемость связаны соотношением

$$\chi = (\mu_a/\mu_0) - 1 = \mu_r - 1,$$

где  $\mu_r = \mu_a/\mu_0$  — относительная магнитная проницаемость вещества. Дифференцирование индукции по полю дает относительную дифференциальную магнитную проницаемость

$$\mu_{rd} = (1/\mu_0) (dB/dH).$$

Эта величина в слабых полях носит название относительной начальной проницаемости, а максимальное ее значение на всей кривой намагничивания — относительной максимальной проницаемости.

При температурах  $T > T_c$  парамагнитная восприимчивость многих магнетиков достаточно хорошо описывается законом Кюри — Вейсса

$$\chi = C/(T - \theta_p),$$

где  $C = \mu_0(N_A/V)\mu^2_{эф}$ ,  $\theta_p$  — парамагнитная температура Кюри, К. Здесь  $V$  — молярный объем,  $m^3/mol$ ;

$\mu_{эф}$  — эффективный атомный магнитный момент,  $A \cdot m^2$ ;  $k$  — постоянная Больцмана.

Кроме определенной выше магнитной восприимчивости единицы объема  $\chi$ , часто используют удельную восприимчивость  $\chi_p$  и молярную восприимчивость  $\chi_m$ , т. е. восприимчивости в расчете на единицу массы или моль вещества. Эти величины связаны между собой формулами

$$\chi_p = \chi/\rho \text{ и } \chi_m = \chi_p M,$$

где  $\rho$  — плотность,  $kg/m^3$ .

В СИ и системе СГСМ объемная восприимчивость — безразмерная величина, удельная восприимчивость выражается в  $m^3/kg$  и  $cm^3/g$  (в англоязычной литературе — в  $emu/g$ ), а молярная восприимчивость — в  $m^3/моль$  и  $cm^3/моль$  (в англоязычной литературе — в  $emu/mol$ ).

Единица абсолютной магнитной проницаемости в СИ —  $Gn/m$ . В системе СГСМ магнитная проницаемость  $\mu$ , определяемая формулой  $B = \mu H$ , безразмерна (как и относительная проницаемость в СИ).

**Магнитная анизотропия.** Различие магнитных свойств ферромагнетика вдоль неэквивалентных направлений в теле, называемое магнитной анизотропией, наиболее выражено в монокристаллах. Мерой магнитной анизотропии является работа намагничивания, необходимая для поворота вектора  $J$  из положения вдоль оси легкого намагничивания, вдоль которой этот вектор направлен в отсутствие поля, в новое положение — вдоль внешнего поля. Эта работа определяет плотность свободной энергии магнитной анизотропии  $E_a$ ,  $Dж/м^3$ , которая следующим образом выражается через углы между вектором намагниченности  $J$  и кристаллографическими осями:

1) для кубических кристаллов

$$E_a = K_1 s + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + K_3 s^2 + \dots,$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  — направляющие косинусы вектора  $J$ ;

$$s = \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2;$$

2) для гексагональных кристаллов

$$E_a = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots,$$

где  $\theta$  — угол между вектором  $J$  и гексагональной осью  $c$ .

**Магнитострикция.** Изменение размеров и формы тела при его намагничивании называют магнитострикцией. Различают объемную магнитострикцию, характеризующую относительным изменением объема тела  $\omega = \Delta V/V$ , и анизотропную магнитострикцию, характеризующую относительным изменением размеров тела  $\lambda = \Delta l/l$  почти без изменения его объема. Иногда этот вид магнитострикции не совсем точно называют линейной магнитострикцией.

Магнитострикция насыщения, т. е. магнитострикция, возникающая при намагничивании кристалла до насыщения, для кубических кристаллов определяется формулой

$$\begin{aligned} \lambda = & h_1 \left( \alpha_1^2 \alpha_1^2 + \alpha_2^2 \alpha_2^2 + \alpha_3^2 \alpha_3^2 - 1/3 \right) + \\ & + 2h_2 \left( \alpha_1 \alpha_2 \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_3 \alpha_1 \alpha_3 + \alpha_2 \alpha_3 \alpha_2 \alpha_3 \right) + \\ & + h_4 \left( \alpha_1^4 \alpha_1^2 + \alpha_2^4 \alpha_2^2 + \alpha_3^4 \alpha_3^2 - (2/3) s - 1/3 \right) + \\ & + 2h_5 \left( \alpha_1^2 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_2 \alpha_3 + \alpha_1^2 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_1 \alpha_3 + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3^2 \alpha_1 \alpha_2 \right) + \dots + A, \end{aligned}$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  — направляющие косинусы вектора  $J$  и

вектора, вдоль которого производится измерение магнитострикции;  $A=h_3s$ , если направление легкого намагничивания — ось [100];  $A=h_3(s-1/3)$ , если направление легкого намагничивания — ось [111].

Продольная ( $\alpha=\beta_1$ ) магнитострикция вдоль главных кристаллографических осей кубического кристалла определяется формулами

$$\lambda_{100} = (2/3)(h_1 + h_4), \quad \lambda_{110} = (1/12)(2h_1 + 6h_2 + h_4),$$

$$\lambda_{111} = (2/9)(3h_2 + h_5).$$

Часто можно положить  $h_3=h_4=h_5=0$  и пользоваться упрощенной формулой

$$\lambda = (3/2)\lambda_{100}(s-1/3) + 3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_1\alpha_3\beta_1\beta_3 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3).$$

Для поликристаллического материала анизотропную магнитострикцию можно получить из соотношения

$$\lambda = (3/2)\lambda_s(\cos^2\theta - 1/3),$$

где  $\lambda_s = (2\lambda_{100} + 3\lambda_{111})/5$ , а  $\theta$  — угол между вектором  $\mathbf{J}$  и направлением измерения

Магнитострикция насыщения гексагональных кристаллов описывается выражением

$$\begin{aligned} \lambda = & \lambda_A [(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2 - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\alpha_3\beta_3] + \\ & + \lambda_B [(1-\alpha_3^2)(1-\beta_3^2) - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2] + \\ & + \lambda_C [(1-\alpha_3^2)\beta_3^2 - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\alpha_3\beta_3] + \\ & + 4\lambda_D (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\alpha_3\beta_3. \end{aligned}$$

Направляющие косинусы  $\alpha_i, \beta_i$  относятся к системе прямоугольных координат, где оси 1(x) и 2(y) совпадают с направлением  $a$  и  $b$ , а ось 3(z) — с гексагональной осью  $c$  (см. рис. 27.35).

Для поликристаллического материала продольная магнитострикция насыщения может быть получена по формуле

$$\lambda_1 = (2/5)\lambda_A + (8/15)\lambda_D.$$

Поперечная магнитострикция насыщения (т. е. магнитострикция, измеряемая в направлении, перпендикулярном  $\mathbf{J}$ ) выражается формулой

$$\lambda_{\perp} = (2/15)\lambda_A + (1/3)(\lambda_B + \lambda_C) - (4/15)\lambda_D.$$

Для гексагональных кристаллов редкоземельных металлов (см. рис. 27.32—27.34) применяют отличные от приведенного выше выражения для магнитострикции насыщения

$$\begin{aligned} \lambda = & [\lambda_1^{a,0} + \lambda_1^{a,2}(\alpha_3^2 - 1/3)](\beta_1^2 + \beta_2^2) + \\ & + [\lambda_2^{a,0} + \lambda_2^{a,2}(\alpha_3^2 - 1/3)]\beta_3^2 + \\ & + \frac{1}{2}\lambda_1^{a,2}[(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2 - (\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1)^2] + \\ & + 2\lambda_1^{a,2}(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\alpha_3\beta_3 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \lambda = & A[2\alpha_1\alpha_2\beta_1(\beta_1^2 - \alpha_2^2)\beta_2] + \\ & + B\alpha_1^2[(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2 - (\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1)^2] + \\ & + C[(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2 - (\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1)^2] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + D(1-\alpha_3^2)(1-\beta_3^2) + E\alpha_3^2\beta_3^2(1-\alpha_3^2) + \\ & + F\alpha_3^2(1-\alpha_3^2) + G\beta_3^2(1-\alpha_3^2) + H\alpha_3\beta_3(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2) + \\ & + I\alpha_3\beta_3^2(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2) + J\alpha_3^2(1-\beta_3^2) + K\alpha_3^2\beta_3^2. \end{aligned}$$

(Иногда обозначают  $C=\lambda^{a,2}/2$ ,  $A=-\lambda^{a,4}$ .)

**Магнитомягкие материалы.** Магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью  $H \sim 10 \div 10^3$  А/м, относятся к магнитомягким. Для этих материалов характерны высокие значения магнитной проницаемости — начальной  $\mu_{нач} \sim 10^2 \div 10^5$  и максимальной  $\mu_{max} \sim 10^3 \div 10^6$ . Коэрцитивная сила  $H_c$  магнитомягких материалов составляет обычно от 1 до  $10^2$  А/м, а потери на магнитный гистерезис очень малы —  $1 - 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> на один цикл перемагничивания. Для многих материалов в качестве справочной характеристики приводят удельные потери, т. е. мощность потерь  $P$ , на частотах перемагничивания поля 50 или 400 Гц при различных значениях амплитуды индукции (например,  $P_{1,0/50}$  — мощность потерь на частоте 50 Гц при индукции, равной 1,0 Тл).

**Магнитострикционные материалы.** Основными характеристиками магнитострикционных материалов (см. табл. 27.32), применяющихся для изготовления магнитострикционных преобразователей, являются: коэффициент магнитомеханической связи  $K$ , квадрат которого равен отношению преобразованной энергии (механической или магнитной) к подводимой (соответственно магнитной или механической), динамическая магнитострикционная постоянная  $a = (\partial\sigma/\partial B)_\epsilon$  и магнитострикционная постоянная чувствительности  $\Lambda = (\partial B/\sigma)_H$ , где  $\sigma$  — механическое напряжение, Н/м<sup>2</sup>,  $B$  — магнитная индукция, Тл, а индексы  $\epsilon$  и  $H$  означают неизменность деформации и магнитного поля. Величина  $a$  существенна для работы излучателей, а  $\Lambda$  — для работы приемников. Плотность  $\rho$  и модуль Юнга  $E$  определяют резонансную частоту преобразователей; от механической прочности, магнитострикции насыщения  $\lambda_s$  и индукции насыщения  $B_s$  зависит предельная интенсивность магнитострикционных излучателей; механическая добротность  $Q$ , удельное электрическое сопротивление  $\rho_{эл}$  и коэрцитивная сила  $H_c$  определяют потери энергии на вихревые токи и гистерезис при работе преобразователей. Значения  $K$ ,  $a$ ,  $\Lambda$  существенно зависят от напряженности подмагничивающего поля, значение которого  $H_{опт}$ , отвечающее максимуму  $K$ , обычно называют оптимальным.

**Магнитотвердые материалы.** К магнитотвердым относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью  $H \sim 10^3 \div 10^5$  А/м. Магнитотвердые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и максимальной плотности магнитной энергии  $(BH)_{max}$  на участке  $B_r - H_{св}$  размагничивания петли гистерезиса (рис. 27.1).

В § 27.1 и 27.3 в каждом из пунктов, объединяющих ту или иную группу металлических ферромагнетиков, сначала приводятся температурные зависимости парамагнитной восприимчивости, зависимости намагниченности, удельного или атомного магнитного моментов от температуры, магнитного поля, состава сплавов и зависимости температур Кюри сплавов от их состава. Затем идут данные по магнитной анизотропии и, наконец, по магнитострикции.

При отборе материала не ставилась задача достичь всеобъемлющей полноты, а делалась попытка отразить современное состояние и тенденции развития физики

магнитных явлений. В главе дается также информация как о наиболее распространенных отечественных технических магнитных материалах, так и о перспективных материалах, едва вышедших за пределы лабораторий.

Наиболее полные сведения о магнитных свойствах ферромагнитных металлов и сплавов можно найти в монографиях [3, 4, 59]. Свойства металлических ферромагнитных материалов описаны в учебнике [25] и справочниках [26—28]

## 27.2. ЭЛЕМЕНТЫ

**27.2.1. Железо, кобальт, никель.** Среди переходных *d*-металлов ферромагнитны только Fe, Co и Ni (3 *d*-металлы), составляющие основу почти всех магнитных материалов. В табл. 27.1 — 27.5 и на рис. 27.2—27.15 содержатся сведения об их магнитных свойствах. Обзор магнитных свойств этих металлов дан в [110].

Таблица 27.2. Зависимости относительной намагниченности  $J_s/J_0$  для Fe, Co и Ni от относительной температуры  $T/T_C$  [30]

| $T/T_C$ | Fe    | Co, Ni | $T/T_C$ | Fe   | Co, Ni |
|---------|-------|--------|---------|------|--------|
| 0       | 1     | 1      | 0,7     | 0,85 | 0,83   |
| 0,1     | 0,996 | 0,996* | 0,8     | 0,77 | 0,73   |
| 0,2     | 0,99  | 0,99   | 0,85    | 0,70 | 0,66   |
| 0,3     | 0,975 | 0,98   | 0,90    | 0,61 | 0,56   |
| 0,4     | 0,95  | 0,96   | 0,95    | 0,46 | 0,40   |
| 0,5     | 0,93  | 0,94   | 1       | 0    | 0      |
| 0,6     | 0,90  | 0,90   |         |      |        |

\* Только для Ni.

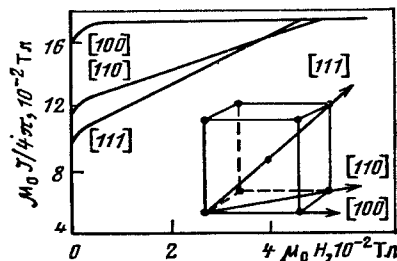
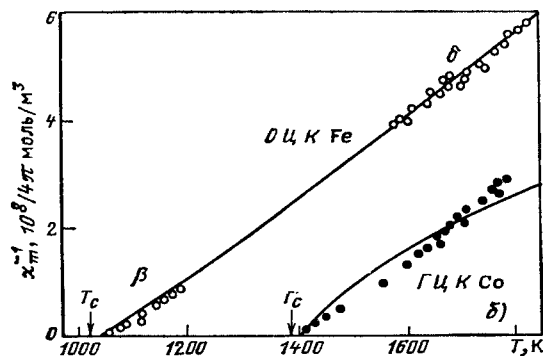
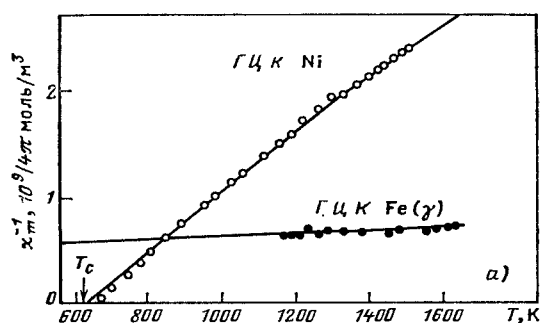


Рис. 27.3. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлений монокристалла Fe при  $T=20^\circ\text{C}$  [67]

Рис. 27.2. Температурные зависимости обратной молярной парамагнитной восприимчивости для гранецентрированного кубического Ni [31] и гранецентрированной кубической  $\gamma$ -фазы Fe (а), а также для объемноцентрированных кубических  $\beta$ - и  $\delta$ -фаз Fe и гранецентрированной кубической фазы Co (б) [91]

Таблица 27.1. Основные магнитные свойства Fe, Co, Ni

| Элемент | $\sigma_0$ , А · м²/кг | $n$ , $\mu_B$                                                      | $T_C$ , К   | $\sigma_s$ (4,2 К), А · м²/кг                                 | $\sigma_s$ (287 К), А · м²/кг | Литература   |
|---------|------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------|
| Fe      | 221,71 (0,08)          | 2,216<br>2,226                                                     | 1044 (2)    | 222,671                                                       | 218,210                       | [55]<br>[94] |
| Co*     | 162,55                 | 1,715<br>1,729 (H    c)<br>1,721 (H    [100] в базисной плоскости) | 1388 (2)    | 163,862 (H    c)<br>163,078 (H    [100] в базисной плоскости) | 162,624                       | [90]<br>[94] |
| Ni      | 58,57 (0,03)           | 0,616<br>0,619                                                     | 627,4 (0,3) | 58,872                                                        | 55,370                        | [55]<br>[94] |

\* В области температур около 700 К в Co происходит переход из гексагональной плотноупакованной (ГПУ)  $\alpha$ -фазы, устойчивой при низких температурах, в гранецентрированную кубическую (ГЦК)  $\beta$ -фазу, устойчивую при высоких температурах [110].

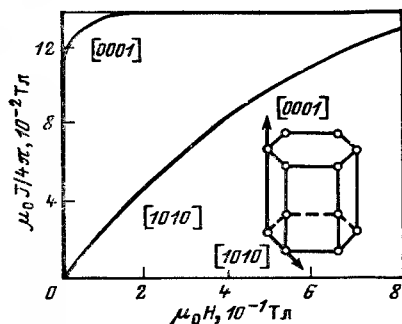


Рис. 27.4. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлений монокристалла Со при  $T=20^\circ\text{C}$  [74]

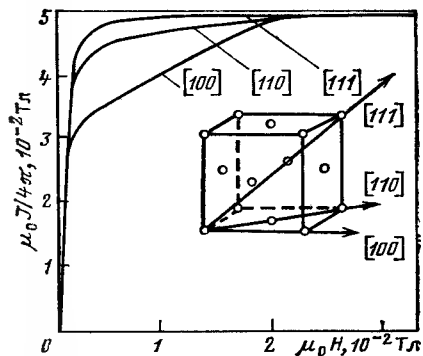


Рис. 27.5. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлений монокристалла Ni при  $T=20^\circ\text{C}$  [73]

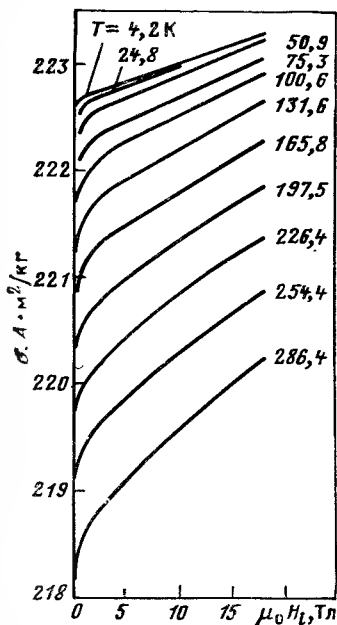


Рис. 27.6. Кривые намагничивания кристалла Fe в сильных магнитных полях при различных температурах. Намагниченности вдоль осей [100], [110] и [111] различаются здесь менее чем на 0,05%. Кривые проведены по средним значениям этих намагниченностей;  $\mu_0 H_i$  — индукция внутреннего магнитного поля [94]

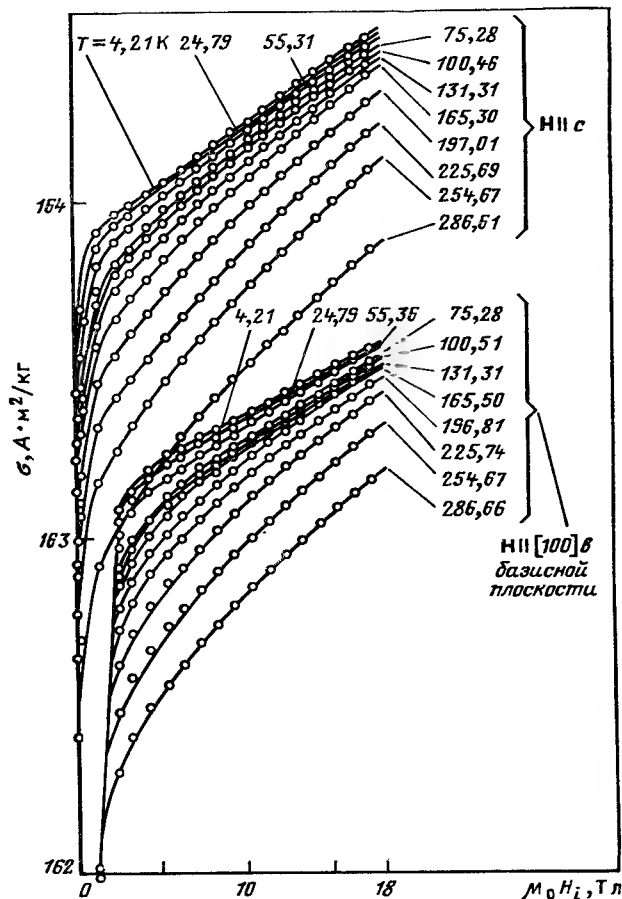


Рис. 27.7. Кривые намагничивания гексагонального кристалла Со в сильных магнитных полях при различных температурах;  $H_i$ ,  $H$  — внутреннее и внешнее магнитные поля,  $c$  — гексагональная ось [94]



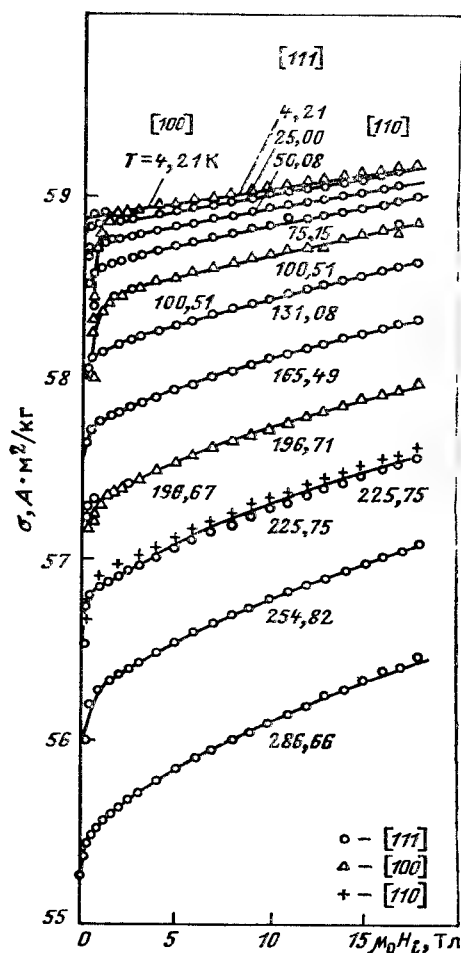


Рис. 27.8. Кривые намагничивания кристалла Ni в сильных магнитных полях при различных температурах,  $\mu_0 H_i$  — индукция внутреннего магнитного поля [94]

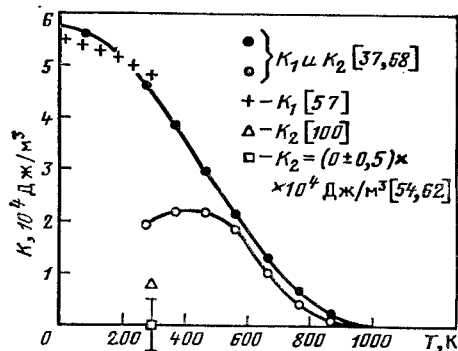


Рис. 27.9. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии Fe

Рис. 27.11. Температурные зависимости констант магнитокристаллографической анизотропии Ni из [57] (а, кружки — первая работа [57], крестики — вторая) и [32] (б)

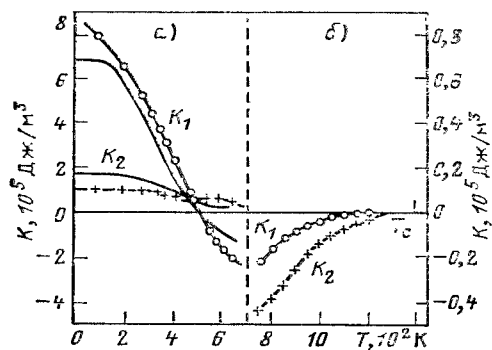


Рис. 27.10. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии  $S_0$  для гексагональной (а) и кубической гранецентрированной (б) фаз: кривые с экспериментальными точками — данные [69, 104], кривые без экспериментальных точек — данные [33]

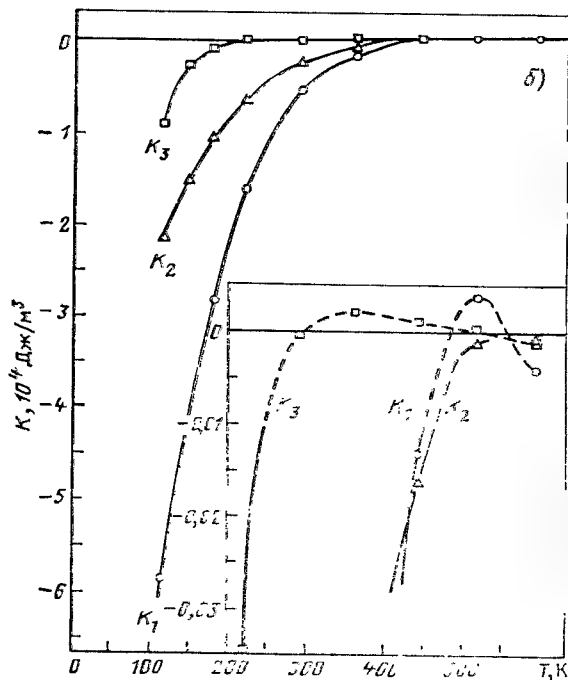
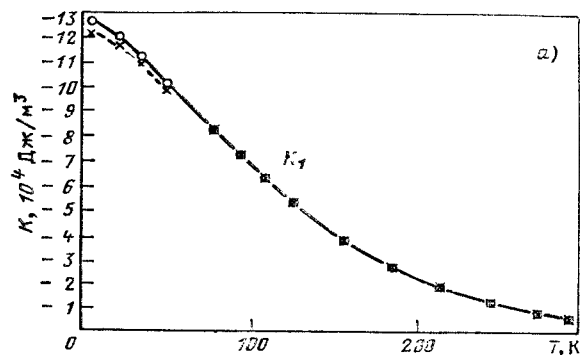


Таблица 27.3. Производная  $(1/\mu_0)(\partial\omega/\partial H)_T$  для элементов группы железа

| Вещество           | T, К | $\frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial\omega}{\partial H} \right)_T$<br>$10^{-6} \text{ Тл}^{-1}$ | Литература |
|--------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Fe                 | 1,5  | 4,5                                                                                               | [102]      |
|                    | 77   | 4,5                                                                                               | [102]      |
|                    | 293  | 4,5—6                                                                                             | [77, 102]  |
| $\beta$ -Co, ГЦК*  | 4,2  | 4,8                                                                                               | [101]      |
|                    | 293  | 5                                                                                                 | [102]      |
| $\alpha$ -Co, ГПУ* | 4,2  | 3,2                                                                                               | [101]      |
|                    |      | 7,2                                                                                               | [110]      |
|                    | 293  | 6                                                                                                 | [39]       |
| Ni                 | 4,2  | 1,2                                                                                               | [105]      |
|                    | 77   | 1,5                                                                                               |            |
|                    | 294  | 1,0                                                                                               |            |
|                    | 377  | 0,5                                                                                               |            |
|                    | 428  | 0,0                                                                                               |            |
|                    | 479  | -0,7                                                                                              |            |
|                    | 568  | -3,8                                                                                              |            |
|                    | 606  | -11,0                                                                                             |            |

\* См. примеч. к табл. 27.1.

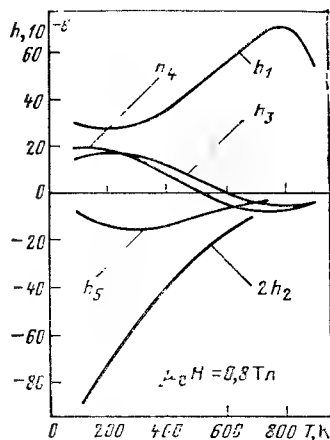


Рис. 27.12. Температурные зависимости констант магнитострикции Fe [109]

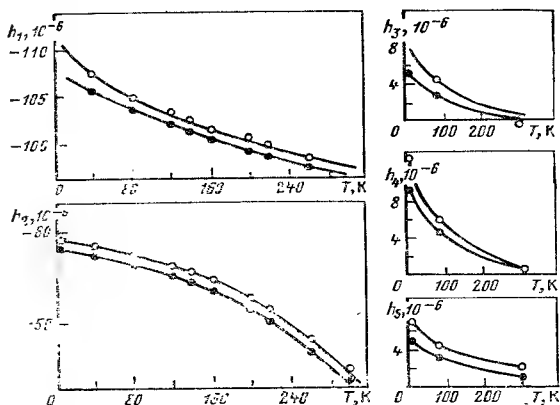


Рис. 27.13. Температурные зависимости констант магнитострикции двух образцов Ni (черные и белые кружки) [78]

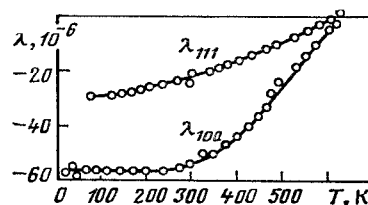


Рис. 27.14. Температурные зависимости магнитострикции  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  Ni [77]

Таблица 27.4. Константы магнитострикции,  $10^{-6}$ , Fe и Ni при комнатной температуре

| Элемент | $h_1$     | $h_2$     | $h_3$      | $h_4$      | $h_5$     | Литература |
|---------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| Fe      | 36,2      | -34,0     | 2          | —          | —         | [61]       |
| Ni      | -94 ÷ -99 | -42 ÷ -44 | -0,7 ÷ 0,1 | -1,4 ÷ 3,4 | 0,2 ÷ 1,5 | [36, 78]   |

Таблица 27.5. Константы магнитострикции  $\alpha$ -Co (ГПУ)\* при различных температурах [70]

| T, °C   | $\lambda_A \cdot 10^{-6}$ | $\lambda_B \cdot 10^{-6}$ | $\lambda_C \cdot 10^{-6}$ | $\lambda_D \cdot 10^{-6}$ |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| -200    | -66                       | -123                      | +126                      | -128                      |
| 0       | -52                       | -109                      | +126                      | -103                      |
| 20      | -50                       | -107                      | +126                      | -105                      |
| 200     | -32                       | -88                       | +120                      | -82                       |
| 400     | -16                       | -70                       | +105                      | -52                       |
| 20 [39] | -45                       | -95                       | +110                      | -100                      |

\* См. примеч. к табл. 27.1.

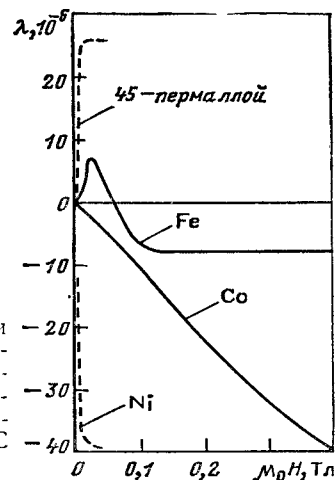


Рис. 27.15. Зависимости продольной магнитострикции поликристаллических образцов от индукции внешнего магнитного поля при  $T=20^\circ\text{C}$  [3]

27.2.2. Редкоземельные и актиноидные элементы. Ферромагнитное упорядочение в f-металлах чаще реализуется в довольно сложных магнитных структурах («Конус», «Ферри» на рис. 27.16), переход к которым из парамагнитного состояния («Пара» на рис. 27.16)

осуществляется при понижении температуры, как правило, через антиферромагнитные (АФ) фазы («Спираль», «АФ-конус», «Волна» на рис. 27.16)

Есть сведения о ферромагнитных, метастабильных при комнатной и более низких температурах, кубических фазах Pr, Nd и Pm [80]. Обнаружен [71] ферромагнетизм кубической гранцентрированной фазы Sm (см. рис. 27.29, 27.30), которая также, видимо, метастабильна при температурах, меньших температуры Кюри.

Данные о магнитных свойствах редкоземельных металлов приведены в табл. 27.6.

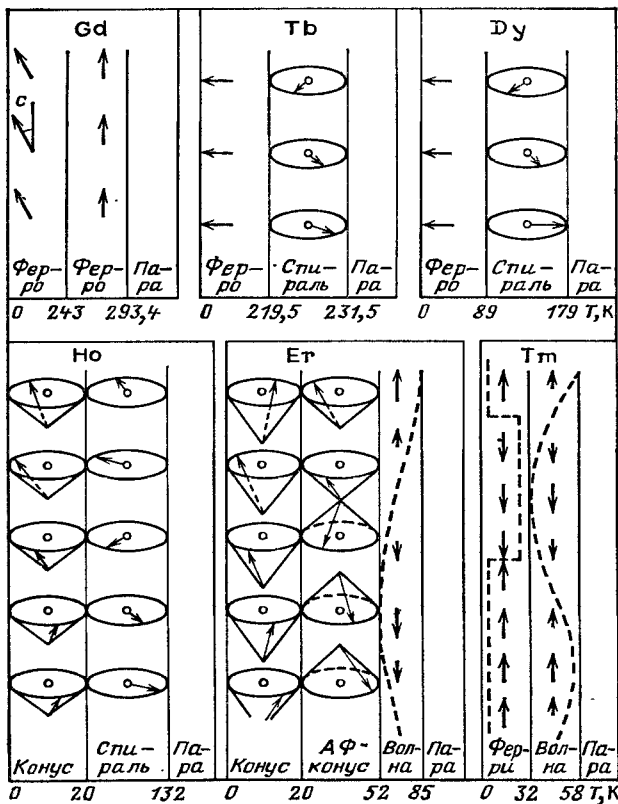


Рис. 27.16. Виды магнитного упорядочения в тяжелых редкоземельных элементах по данным нейтронографии [80]

Таблица 27.6. Магнитные свойства ферро- и ферримагнитных редкоземельных металлов (фаза с пространственной группой  $R\bar{6}_3/mmc$ ) [80]

| Элемент | $\mu_{\text{эф}}, \mu_B$ | $n, \mu_B$ | Направление оси легкого намагничивания при $T=0$ К | $T_N, \text{К}$ | $T_C, \text{К}$ | $\Theta_p, \text{К}$ |             |
|---------|--------------------------|------------|----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------|
|         |                          |            |                                                    |                 |                 | $H \parallel c$      | $H \perp c$ |
| Gd      | 7,98                     | 7,63       | —                                                  | —               | 293,4           | 317                  | 317         |
| Tb      | 9,77                     | 9,34       | b                                                  | 230,0           | 219,5           | 195                  | 239         |
| Dy      | 10,83                    | 10,33      | a                                                  | 179,0           | 89,0            | 121                  | 169         |
| Ho      | 11,2                     | 10,34      | b                                                  | 132,0           | 20,0            | 73,0                 | 88,0        |
| Er      | 9,9                      | 9,1        | —                                                  | 85,0            | 20,0            | 61,7                 | 32,5        |
| Tm      | 7,61                     | 7,14       | c                                                  | 58,0            | 32,0            | 41,0                 | -17,0       |

Температурные и полевые зависимости спонтанного магнитного момента, а также температурные зависимости обратной парамагнитной восприимчивости рассматриваемой группы элементов даны на рис. 27.17—27.30.

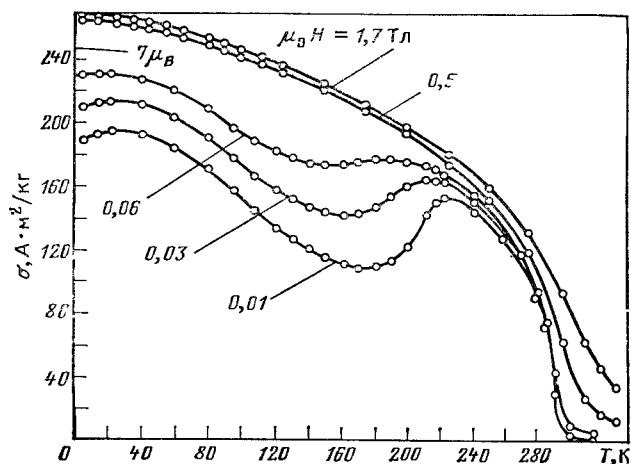


Рис. 27.17. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси  $c$ ) кристалла Gd при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [92]

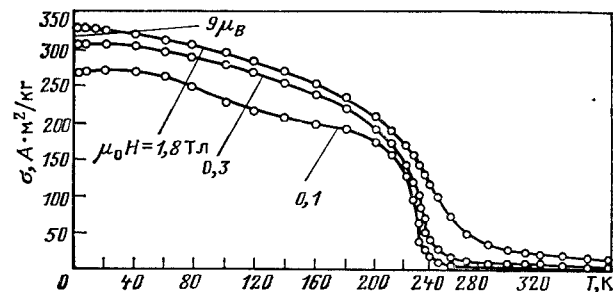


Рис. 27.18. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси  $b$ ) кристалла Tb при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [66]

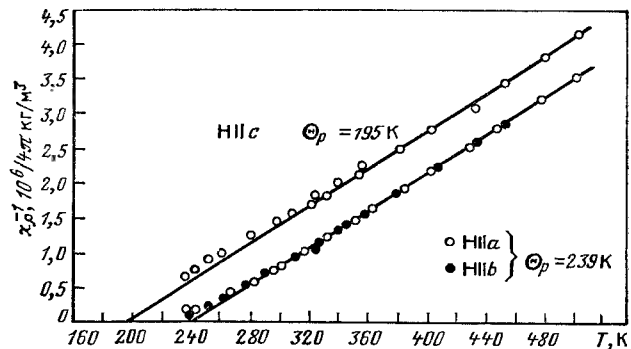


Рис. 27.19. Температурные зависимости обратной удельной парамагнитной восприимчивости (вдоль осей  $a$ ,  $b$  и  $c$ ) кристалла Tb [62]

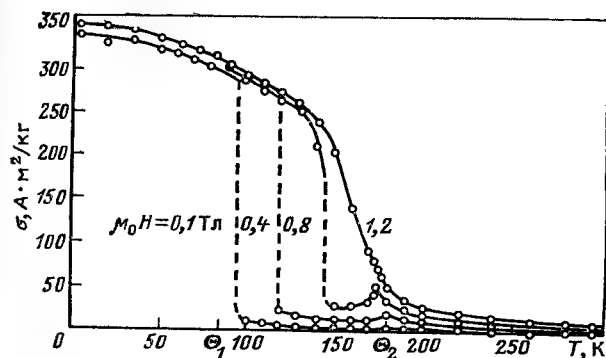


Рис. 27.20. Температурные зависимости удельного магнитного момента монокристалла Dy при различных значениях индукции магнитного поля, приложенного вдоль оси  $a$  в базисной плоскости [34]

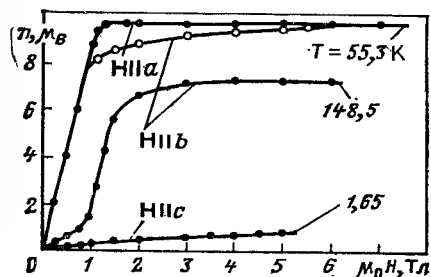


Рис. 27.21. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Dy от индукции внешнего поля [58]

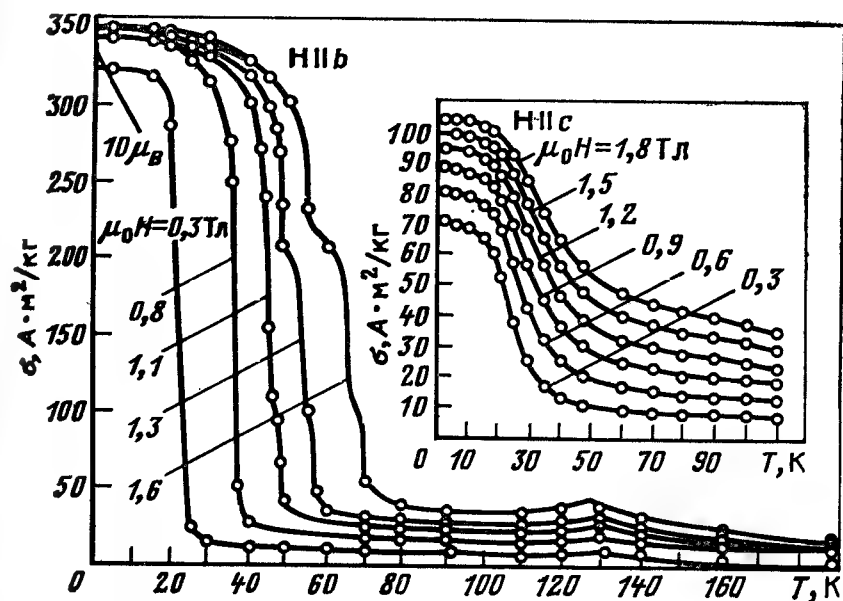


Рис. 27.22. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль осей  $b$  и  $c$ ) кристалла Ho при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [103]

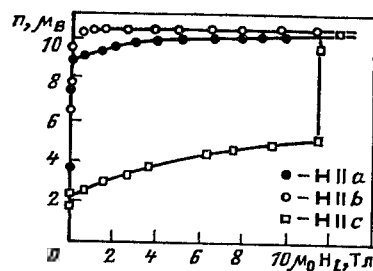


Рис. 27.23. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Ho от индукции внутреннего магнитного поля. Внешнее магнитное поле прикладывалось вдоль осей  $a$ ,  $b$  и  $c$  при температуре 4,2 K [40]

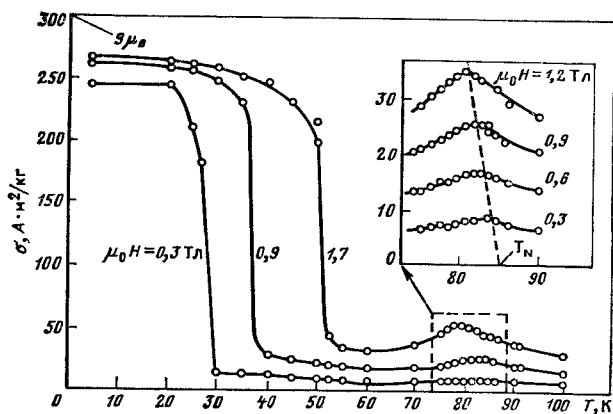


Рис. 27.24. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси  $c$ ) кристалла Ho при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [63]

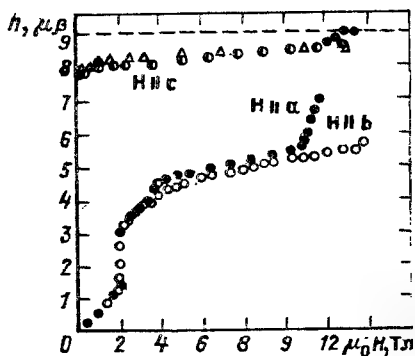


Рис. 27.25. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Тм от индукции магнитного поля, приложенного вдоль осей  $a$ ,  $b$  и  $c$ , при температуре 4,2 К [40]:

○ — значения  $n$  из [97], умноженные на 0,963 [86]

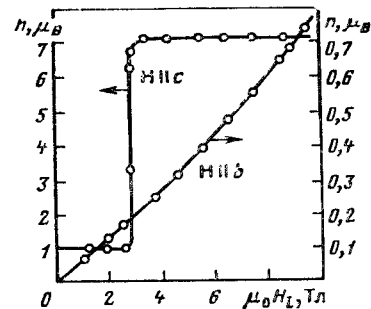


Рис. 27.28. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Тм от индукции внутреннего магнитного поля при  $T=4,2$  К [98]

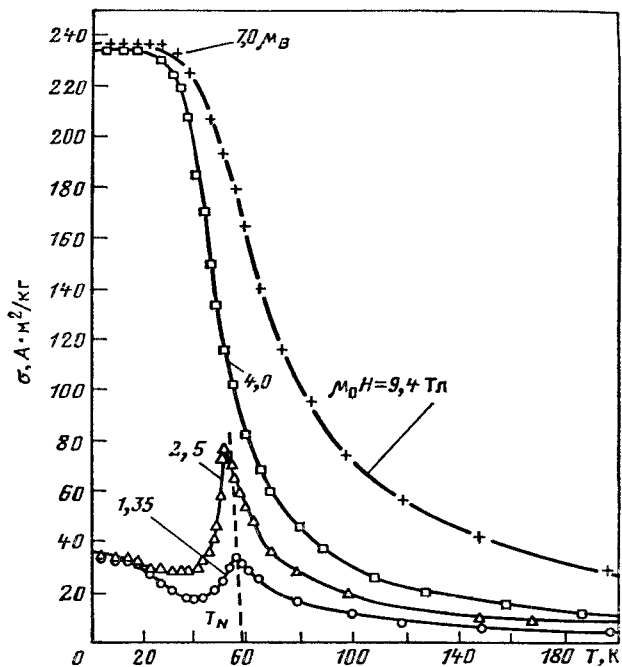


Рис. 27.26. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси  $c$ ) кристалла Тм [98]

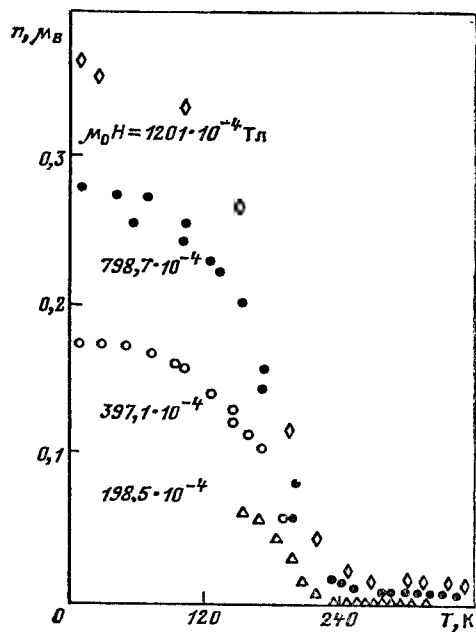


Рис. 27.29. Температурные зависимости атомного магнитного момента для Тм в гранцентрированной кубической  $\beta$ -фазе при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [71]

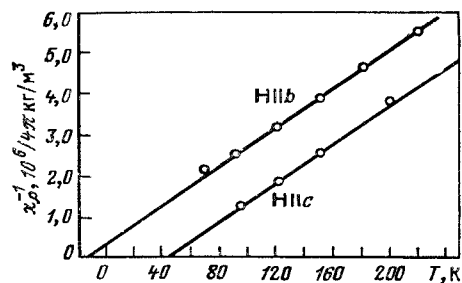
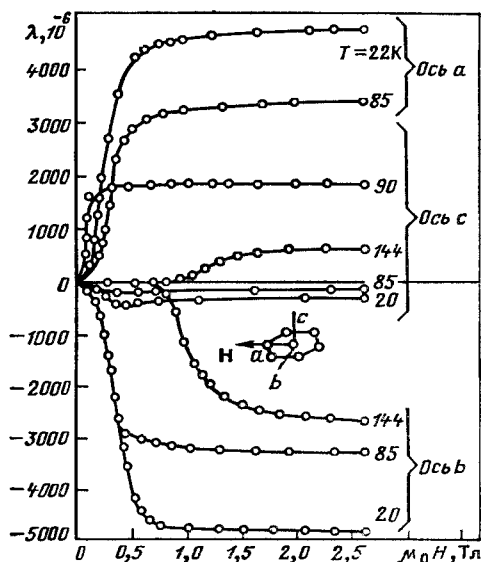
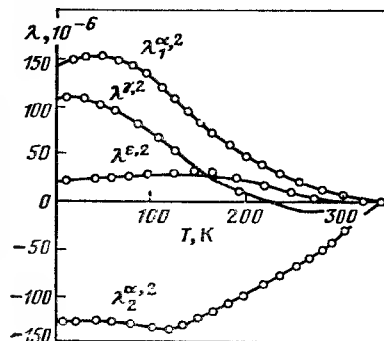
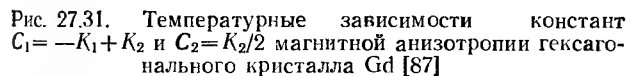
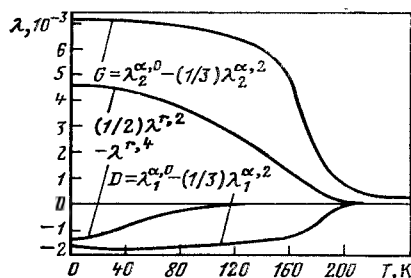
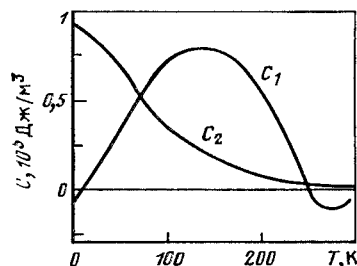
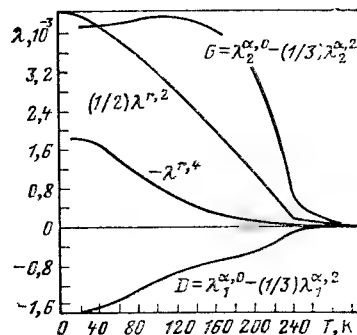
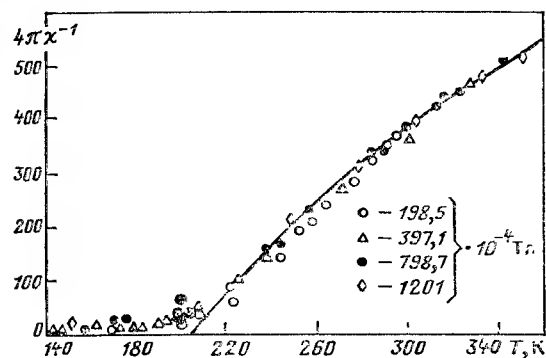


Рис. 27.27. Температурные зависимости обратной удельной восприимчивости в парамагнитной области (вдоль осей  $b$  и  $c$ ) кристалла Тм [98]



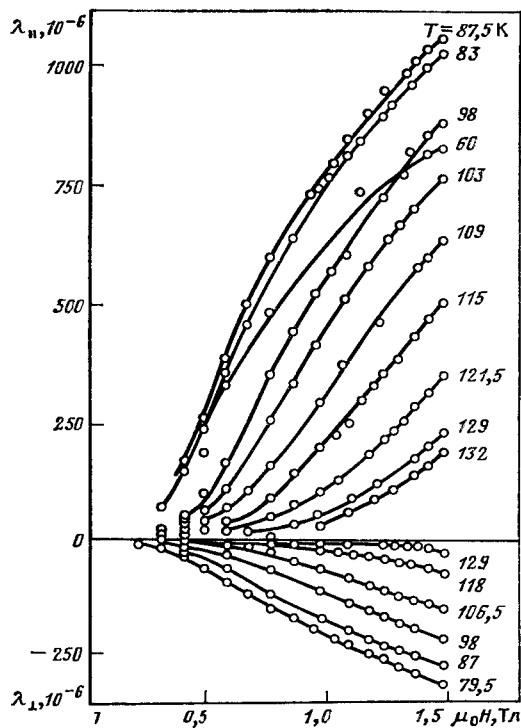


Рис. 27.36. Изотермы продольной  $\lambda_{||}$  и поперечной  $\lambda_{\perp}$  магнитострикции поликристаллического гексагонального Dy [1]

Далее приведены характерные температурные зависимости констант анизотропии и магнитострикции для тяжелых редкоземельных элементов (рис. 27.31—27.34) и, наконец, в качестве примера — зависимость магнитострикции от индукции магнитного поля для Dy (рис. 27.35, 27.36).

### 27.3. СПЛАВЫ

Большинство данных этого параграфа относится к двухкомпонентным системам. Исключение составляют система сплавов Fe—Co—Ni и гейслеровы сплавы.

**27.3.1. Сплавы на основе d-элементов.** Эти сплавы дают огромное разнообразие сочетаний магнитных свойств, зависящих, как правило, от механической и терромагнитной обработки. Это обеспечивает их широкое применение. В этом пункте кроме данных о хорошо изученных и используемых в технике сплавах на основе Fe, Co и Ni (табл. 27.7, 27.8, 27.12 и рис. 27.37—27.54) приведены сведения о гейслеровых сплавах (табл. 27.9), некоторых интерметаллидах (табл. 27.11) и слабых зонных ферромагнетиках (табл. 27.10). В последних малая спонтанная намагниченность ( $n < \mu_B$ ) возникает в результате упорядочения спинов электронов проводимости.

Данные о разбавленных сплавах, обладающих своеобразными ферромагнитными свойствами (см. [89]), не приводятся.

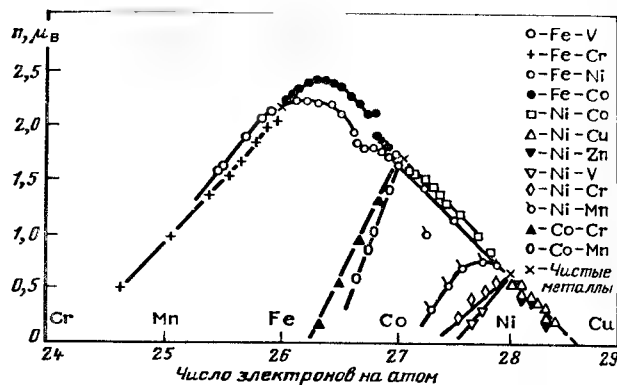


Рис. 27.37. Зависимость атомного магнитного момента сплавов и чистых металлов от среднего числа электронов на атом [3] (кривая Слэтера — Полинга)

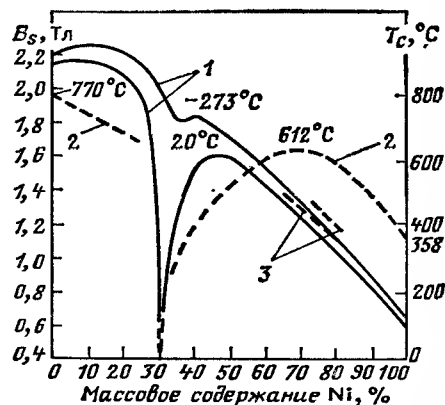


Рис. 27.38. Индукция насыщения (1) температура Кюри (2) сплавов Fe—Ni и индукция насыщения упорядоченных сплавов с составом, близким к FeNi<sub>3</sub> (3) [3]

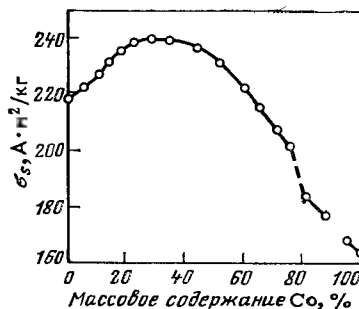


Рис. 27.39. Удельный магнитный момент насыщения сплавов Fe—Co при  $T = 20^\circ\text{C}$  [108]

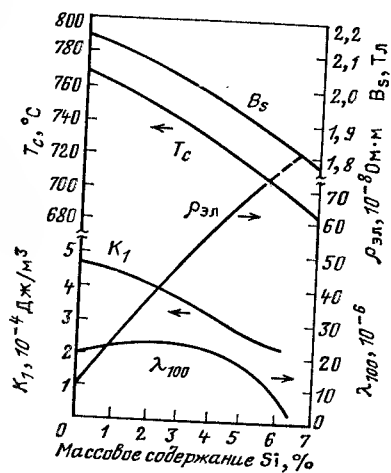


Рис. 27.40. Магнитные свойства и удельное электрическое сопротивление сплавов Fe—Si при  $T = 20^\circ\text{C}$  [81]

Продолжение табл. 27.7

| Второй компонент сплава | Атомное содержание, % | $\sigma_s, \text{A} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$<br>( $T = 20^\circ\text{C}$ ) | $n, \mu_B$ | $T_C, \text{K}$ |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|
| Rh                      | 10,0                  | 209                                                                           | 2,32       | —               |
|                         | 25,0                  | 192                                                                           | 2,39       | 987             |
|                         | 40                    | 161                                                                           | 2,26       | 897             |
| Ru                      | 7,0                   | 200                                                                           | 2,18       | 933             |
|                         | 12,5                  | 105                                                                           | 1,17       | —               |
| Sn                      | 2,3                   | 208                                                                           | 2,18       | 1041            |
|                         | 6,0                   | 197                                                                           | 2,16       | 1041            |
| Si                      | 8,3                   | 204                                                                           | 2,00       | 993             |
|                         | 15,9                  | 174                                                                           | 1,67       | 926             |
|                         | 23,5                  | 141                                                                           | 1,32       | 860             |
| V                       | 5,9                   | 204                                                                           | 2,09       | 1088            |
|                         | 10,6                  | 184                                                                           | 1,91       | 1078            |
|                         | 18,6                  | 149                                                                           | 1,58       | 1056            |

Таблица 27.7. Удельный магнитный момент насыщения и температура Кюри бинарных сплавов железа [30]

| Второй компонент сплава | Атомное содержание, % | $\sigma_s, \text{A} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$<br>( $T = 20^\circ\text{C}$ ) | $n, \mu_B$ | $T_C, \text{K}$ |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|
| Al                      | 7,1                   | 207                                                                           | 2,05       | 1029            |
|                         | 19,7                  | 184                                                                           | 1,74       | 937             |
|                         | 24,9                  | 134                                                                           | 1,29       | 714             |
|                         | 26,0                  | 149                                                                           | 1,40       | 767             |
| Au                      | 6,2                   | 174                                                                           | 2,08       | 1040            |
|                         | 10,2                  | 154                                                                           | 2,02       | 1041            |
| Co                      | 20                    | 236                                                                           | 2,42       | 1223            |
|                         | 33                    | 238                                                                           | 2,52       | 1243            |
|                         | 50                    | 233                                                                           | 2,42       | 1253            |
|                         | 75                    | 203                                                                           | 2,14       | 1143            |
|                         | 80                    | 184                                                                           | 1,94       | 1183            |
| Cr                      | 17,7                  | 196                                                                           | 1,70       | 951             |
|                         | 47,5                  | 90                                                                            | 0,98       | 756             |
|                         | 67,8                  | 35                                                                            | 0,53       | 541             |
|                         |                       |                                                                               |            |                 |
| Ir                      | 4,0                   | 200                                                                           | 2,25       | 1023            |
|                         | 15,0                  | 120                                                                           | 1,67       | —               |
| Os                      | 8,1                   | 158                                                                           | 1,97       | —               |
|                         | 12,5                  | 50                                                                            | 0,69       | —               |
| Pd                      | 5,5                   | 203                                                                           | 2,19       | 1027            |
|                         | 40,0                  | 129                                                                           | 1,89       | —               |
|                         | 74,8                  | 45                                                                            | 0,97       | 523             |
| Pt                      | 8,1                   | 191                                                                           | 2,36       | —               |
|                         | 12,4                  | 177                                                                           | 2,43       | —               |
|                         | 24,8                  | 104                                                                           | 2,23       | 437             |
|                         | 50,0                  | 32                                                                            | 0,75       | —               |

Таблица 27.8. Удельный магнитный момент насыщения и температура Кюри бинарных сплавов кобальта [30]

| Второй компонент сплава | Атомное содержание, % | $\sigma_s, \text{A} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$<br>( $T = 20^\circ\text{C}$ ) | $n, \mu_B$ | $T_C, \text{K}$ |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|
| Cr                      | 5,6                   | 134                                                                           | 1,42       | —               |
|                         | 10,6                  | 100                                                                           | 1,07       | —               |
|                         | 16,7                  | 59,5                                                                          | 0,64       | —               |
|                         | 22,1                  | 19                                                                            | 0,24       | —               |
| Mn                      | 4,2                   | 144                                                                           | 1,53       | —               |
|                         | 11,9                  | 109                                                                           | 1,16       | —               |
|                         | 17,3                  | 84                                                                            | 0,89       | —               |
|                         | 22,5                  | 48                                                                            | 0,57       | —               |
| Ni                      | 40                    | 124                                                                           | 1,38       | 1173            |
|                         | 70                    | 90                                                                            | 0,97       | 953             |



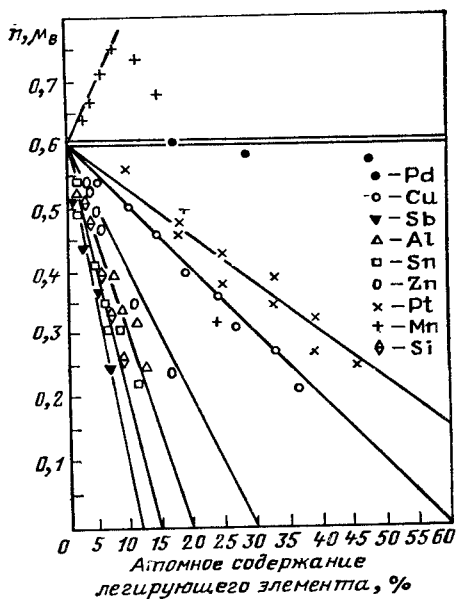


Рис. 27.41. Зависимости атомных магнитных моментов насыщения от состава сплавов Ni с неферромагнитными металлами [3]

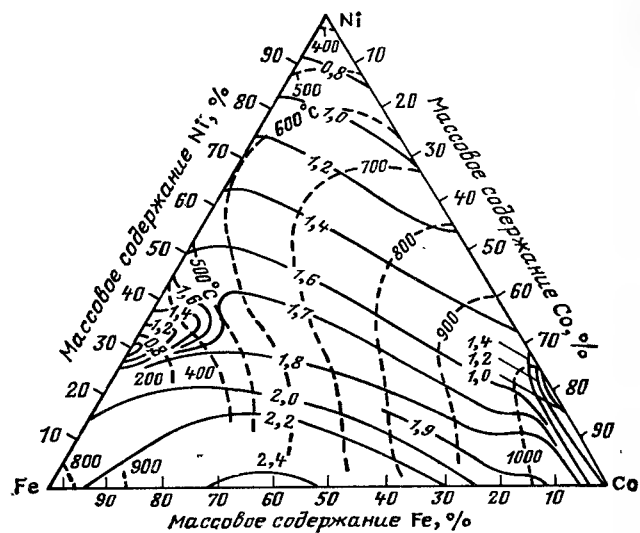


Рис. 27.43. Индукция, соответствующая намагниченности  $\mu_0 J$ ,  $T_c$  (сплошные кривые), в поле с  $H = 1,19 \cdot 10^5$  А/м и температура Кюри,  $^{\circ}\text{C}$  (пунктир) сплавов Fe—Co—Ni [72]

Таблица 27.9. Температура Кюри и атомные магнитные моменты гейслеровых сплавов (простая кубическая структура CsCl) [106]

| Соединение               | $T_C$ , К | $n$ , $\mu_B$ | Соединение               | $T_C$ , К | $n$ , $\mu_B$ |
|--------------------------|-----------|---------------|--------------------------|-----------|---------------|
| $\text{Cu}_2\text{MnAl}$ | 600       | 3,6           | $\text{Ni}_2\text{MnGa}$ | 379       | 4,2           |
| $\text{Cu}_2\text{MnIn}$ | 520       | 4,0           | $\text{Ni}_2\text{MnIn}$ | 323       | 4,4           |
| $\text{Cu}_2\text{MnSn}$ | 530       | 4,1           | $\text{Ni}_2\text{MnSn}$ | 344       | 4,1           |
| $\text{Co}_2\text{MnSi}$ | 982       | 5,1           | $\text{Ni}_2\text{MnSb}$ | 360       | 3,3           |
| $\text{Co}_2\text{MnGa}$ | 694       | 4,1           | $\text{Pd}_2\text{MnGe}$ | 170       | 3,2           |
| $\text{Co}_2\text{MnGe}$ | 905       | 5,1           | $\text{Pd}_2\text{MnSn}$ | 189       | 4,2           |
| $\text{Co}_2\text{MnSn}$ | 829       | 5,1           | $\text{Pd}_2\text{MnSb}$ | 247       | 4,4           |
|                          |           |               | $\text{Au}_2\text{MnAl}$ | 258       | 3,1           |

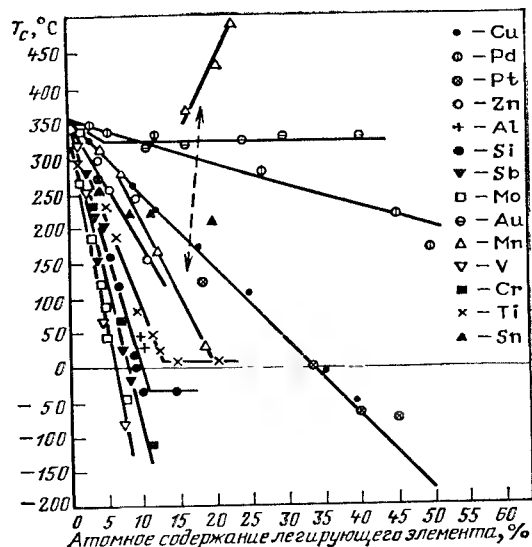


Рис. 27.42. Температуры Кюри сплавов Ni [3]

Таблица 27.10. Магнитные свойства и кристаллическая структура слабых зонных ферромагнетиков на основе переходных *d*-элементов [2, 101]

| Соединение         | Кристаллическая структура                                                                    |                                                  | $10^3 \rho, \text{ кг/м}^3$ | $T_C, \text{ К}$ | $\theta_p, \text{ К}$ | $\mu_{\text{эф}}, \mu_B$ | $n, \mu_B$        | Литература       |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|------------------|
|                    | Сингония, пространственная группа                                                            | Параметры решетки, нм                            |                             |                  |                       |                          |                   |                  |
| ZrZn <sub>2</sub>  | Кубическая <i>Fd3m</i>                                                                       | $a = 0,739$                                      | 7,16                        | 16—27            | 33                    | 1,3—1,4<br>0,75          | 0,12—0,18         | [83, 85]<br>[93] |
| Sc <sub>3</sub> In | Гексагональная <i>P6<sub>3</sub>/mmc</i>                                                     | $a = 0,642 \div 0,656$<br>$c = 0,512 \div 0,518$ | 4,38                        | 6—7,5            | 16                    | 0,67—1,3                 | 0,06—0,15<br>(Sc) | [60, 84]         |
| Au <sub>4</sub> V  | Объемноцентрированная тетрагональная структура типа Ni <sub>4</sub> Mo <i>D1<sub>a</sub></i> | $a = 0,640$<br>$c = 0,398$                       |                             | 43—55            | —                     | 1,4—1,7                  | 0,41—0,92<br>(V)  | [51, 53]         |
| Ni <sub>3</sub> Al | Орторомбическая                                                                              |                                                  | 7,45                        | 41,5—<br>75      | 130                   | 1,0                      | 0,075—0,1         | [35]             |

Таблица 27.11. Атомные магнитные моменты в расчете на атом *3d*-элемента и температуры Кюри некоторых бинарных интерметаллидов [41]

| Соединение                          | Сингония (тип кристаллической структуры)                  | $T_C, \text{ К}$               | $n, \mu_B$                  |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Au <sub>4</sub> Mn                  | Объемноцентрированная тетрагональная (Ni <sub>4</sub> Mo) | 363                            | 4,15                        |
| CoB                                 | Орторомбическая (FeB)                                     | 477                            | 0,28                        |
| Co <sub>2</sub> B                   | Тетрагональная (CuAl <sub>2</sub> )                       | 429                            | 0,76                        |
| Co <sub>3</sub> B                   | Орторомбическая (Fe <sub>3</sub> C)                       | 747                            | 1,11                        |
| CoPt                                | Тетрагональная (AuCu)                                     | 813                            | 0,17                        |
| CoS <sub>2</sub>                    | ГЦК (FeS <sub>2</sub> )                                   | 122—130                        | 0,84—0,96                   |
| CrB <sub>12</sub>                   | Тетрагональная (MoBe <sub>12</sub> )                      | 50                             | ~0,2                        |
| CrGe <sub>2</sub>                   | —                                                         | 98                             | ~0,1                        |
| Cr <sub>1,2</sub> Pt <sub>2,8</sub> | ГЦК (Cu <sub>3</sub> Au)                                  | >77                            | 2,56 (Cr)<br>~0,47 (Pt)     |
| CrS <sub>1,19</sub>                 | Гексагональная (NiAs)                                     | 160 ( $T_N$ )<br>305 ( $T_C$ ) | 0,11                        |
| CrTe                                | Гексагональная (NiAs)                                     | 239—334                        | 2,45                        |
| Cr <sub>3</sub> Te <sub>4</sub>     | Моноклинная                                               | 80 ( $T_N$ )<br>329 ( $T_C$ )  | 2,3                         |
| FeAl                                | Кубическая (CsCl)                                         | 623                            | ~1,0                        |
| Fe <sub>3</sub> Al                  | ОЦК (сверхрешетка CsCl)                                   | 773                            | 1,46 (Fe I)<br>2,14 (Fe II) |
| FeB                                 | Орторомбическая (FeB)                                     | 598                            | 1,12                        |
| Fe <sub>3</sub> B                   | Тетрагональная (CuAl <sub>2</sub> )                       | 1043                           | 1,91                        |
| FeBe <sub>5</sub>                   | ГЦК (MgCu <sub>2</sub> )                                  | 75                             | ~0,1                        |
| Fe <sub>3</sub> C                   | Орторомбическая (Fe <sub>3</sub> C)                       | 483                            | 2,01                        |
| Fe <sub>3</sub> Cr                  | ГЦК (Cu <sub>3</sub> Au)                                  | 993                            | ~1,3                        |
| Fe <sub>3</sub> Ge                  | Гексагональная (Ni <sub>3</sub> Sn)                       | 365                            | 1,90                        |
| FeP                                 | Орторомбическая (MnP)                                     | 215                            | 0,36                        |

Продолжение табл. 27.11

| Соединение                      | Сингония (тип кристаллической структуры)                        | $T_C, \text{ К}$                     | $n, \mu_B$                   |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Fe <sub>2</sub> P               | Гексагональная (Fe <sub>2</sub> P)                              | 266—278                              | 0,77—1,32                    |
| Fe <sub>3</sub> P               | Тетрагональная (Ni <sub>3</sub> P)                              | 716                                  | 1,84                         |
| FePd <sub>3</sub>               | ГЦК (Cu <sub>3</sub> Au)                                        | 540                                  | 2,7 (Fe)<br>0,5 (Pd)<br>~0,2 |
| FePt                            | Тетрагональная (AuCu)                                           | 743                                  |                              |
| FeRh                            | Кубическая (CsCl)                                               | 330 ( $T_N$ )<br>675 ( $T_C$ )       | 3,0 (Fe)<br>0,9 (Rh)         |
| Fe <sub>3</sub> Si              | Кубическая (Cu <sub>2</sub> MnAl)                               | 808                                  | 1,51 (Fe I)<br>2,15 (Fe II)  |
| Fe <sub>3</sub> Sn              | Гексагональная (Ni <sub>3</sub> Sn)                             | 743                                  | 1,9                          |
| MnAs                            | Гексагональная (NiAs)                                           | 318 (нагревание)<br>306 (охлаждение) | 3,4                          |
| MnB                             | Орторомбическая (FeB)                                           | 578                                  | 1,92                         |
| MnB <sub>2</sub>                | Гексагональная (AlB <sub>2</sub> )                              | 143—157                              | 0,19—0,25                    |
| MnBi                            | Гексагональная (NiAs)                                           | 633                                  | 3,52                         |
| Mn <sub>3</sub> Ga              | Гексагональная (Ni <sub>3</sub> Sn)                             | 470                                  | ~0,02                        |
| Mn <sub>3</sub> Ge              | Гексагональная (Ni <sub>3</sub> Sn)                             | 28                                   | 0,38                         |
| Mn <sub>5</sub> Ge <sub>3</sub> | Гексагональная (Mn <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> )               | 320                                  | 2,5                          |
| Mn <sub>3</sub> In              | Кубическая (Cu <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub> , $\gamma$ -латунь) | 583                                  | ~0,1                         |
| MnPt <sub>3</sub>               | ГЦК (Cu <sub>3</sub> Au)                                        | <300                                 | 3,60 (Mn)<br>0,17 (Pt)       |
| MnSb                            | Гексагональная (NiAs)                                           | 583                                  | 3,53                         |
| MnSi                            | Кубическая (FeSi)                                               | 34                                   | 0,4                          |
| Mn <sub>5</sub> Sn <sub>3</sub> | Гексагональная (NiIn)                                           | 263                                  | 1,23                         |
| Mn <sub>5</sub> Y               | Орторомбическая (GdMn <sub>5</sub> )                            | 490                                  | 2,2                          |

| Соединение        | Сигнония (тип кристаллической структуры) | $T_C$ , К | $n$ , $\mu_B$ |
|-------------------|------------------------------------------|-----------|---------------|
| MnZn <sub>3</sub> | Гексагональная (Ni <sub>3</sub> Sn)      | >400      | ~1,0          |
| NiPt              | Тетрагональная (AuCu)                    | 136       | 0,06          |
| Ni <sub>3</sub> Y | Орторомбическая (CeNi <sub>3</sub> )     | 33        | 0,16          |

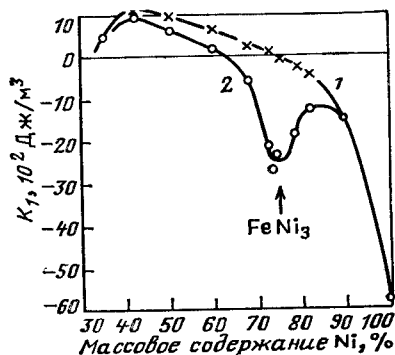


Рис. 27.44. Константа магнитной анизотропии  $K_1$  для сплавов Fe—Ni при  $T=20^\circ\text{C}$ :

1 — закаленные, неупорядоченные сплавы; 2 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [38]

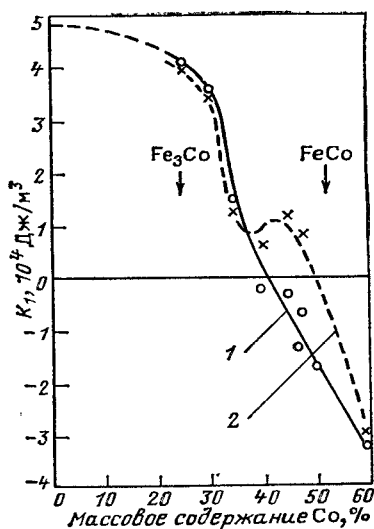


Рис. 27.45. Константы магнитной анизотропии  $K_1$  для сплавов Fe—Co при  $T=20^\circ\text{C}$ :

1 — закаленные, упорядоченные сплавы; 2 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [65]

Таблица 27.12. Зависимость констант магнитной анизотропии  $K_1$  и  $K_2$ ,  $10^2$  Дж/м<sup>3</sup>, для сплавов Fe—Co—Ni и Co—Ni от температуры [3, 77]

| Массовый состав, % |    |    | $T = 20^\circ\text{C}$ |       | $T = 200^\circ\text{C}$ |       | $T = 398^\circ\text{C}$ |       |
|--------------------|----|----|------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| Fe                 | Co | Ni | $K_1$                  | $K_2$ | $K_1$                   | $K_2$ | $K_1$                   | $K_2$ |
| 50                 | 10 | 40 | 61                     | -160  | 19                      | 4     | 7                       | -60   |
| 25                 | 25 | 50 | 4                      | 16    | 4                       | 2     | -3                      | 22    |
| 20                 | 15 | 65 | 9                      | -110  | -1                      | -18   | -3                      | 2     |
| 15                 | 25 | 60 | -26                    | 34    | -10                     | -45   | -3                      | -15   |
| 10                 | 40 | 50 | -72                    | -4    | -54                     | 41    | -9                      | -102  |
| 10                 | 30 | 60 | -38                    | -80   | -17                     | -50   | -12                     | -37   |
| 10                 | 20 | 70 | -29                    | 17    | -25                     | 70    | -14                     | 29    |
| 10                 | 10 | 80 | -2                     | -39   | -2                      | -20   | -2                      | 6     |
| —                  | 65 | 35 | -258                   | 150   | —                       | —     | —                       | —     |
| —                  | 50 | 50 | -108                   | -40   | —                       | —     | —                       | —     |
| —                  | 40 | 60 | -74                    | 40    | —                       | —     | —                       | —     |
| —                  | 20 | 80 | -4                     | 8     | —                       | —     | —                       | —     |
| —                  | 10 | 90 | 16                     | -40   | —                       | —     | —                       | —     |
| —                  | 3  | 97 | -10                    | 9     | —                       | —     | —                       | —     |

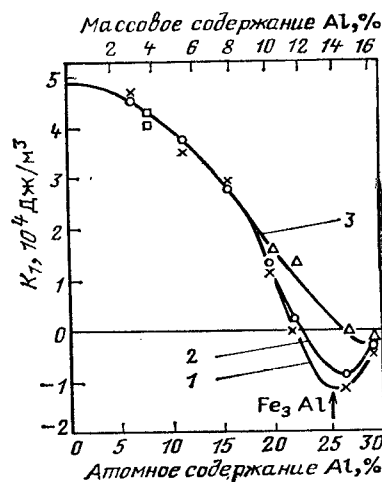


Рис. 27.46. Константы магнитной анизотропии  $K_1$  для сплавов Fe—Al при  $T=20^\circ\text{C}$ :

1 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы; 2 — частично упорядоченные сплавы; 3 — закаленные, неупорядоченные сплавы [64]

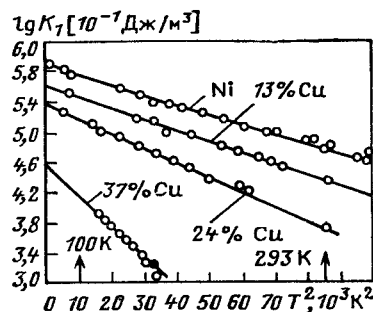


Рис. 27.47. Температурные зависимости константы магнитной анизотропии сплавов Ni—Cu различного состава [3]

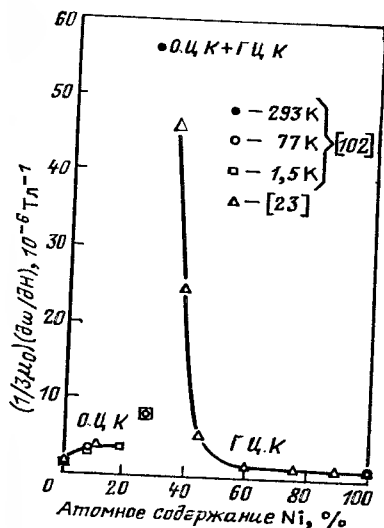


Рис. 27.48. Производная  $(1/3 \mu_0) (d\omega/dH)_T$  для сплавов Fe—Ni

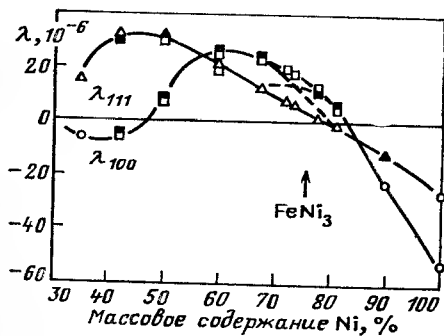


Рис. 27.49. Константы магнитострикции кубических гранецентрированных сплавов Fe—Ni при  $T=20^\circ\text{C}$ : сплошные кривые — закаленные, неупорядоченные сплавы; пунктир — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [38]

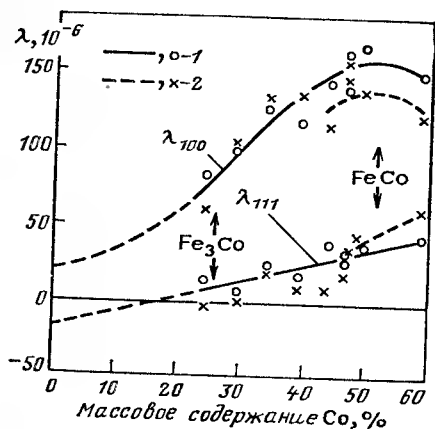


Рис. 27.50. Магнитострикция насыщения вдоль кристаллографических осей [100] и [111] для сплавов Fe—Co при  $T=20^\circ\text{C}$ :

1 — закаленные, неупорядоченные сплавы; 2 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [66]

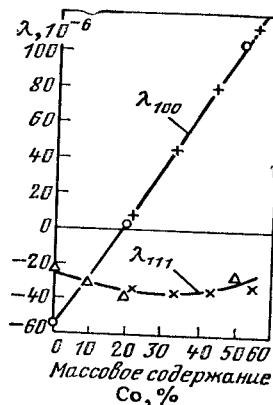


Рис. 27.51. Константы магнитострикции  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  кубических гранецентрированных сплавов Co—Ni при  $T=20^\circ\text{C}$  [45] по данным [64, 111]

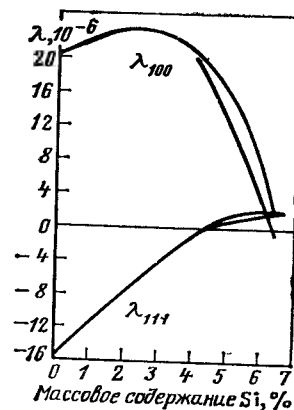


Рис. 27.52. Константы магнитострикции сплавов Fe—Si при  $T=20^\circ\text{C}$ :

нижние кривые в области массового содержания Si 4—7% — зависимости для более упорядоченных образцов, охлаждавшихся медленнее [64]

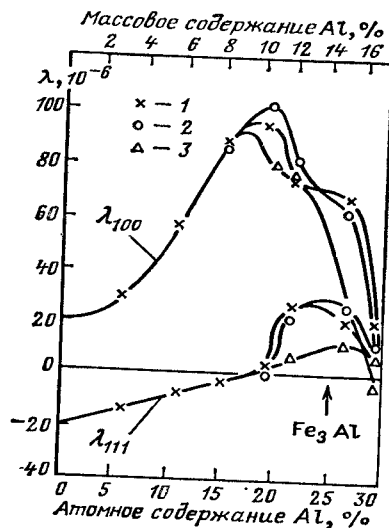


Рис. 27.53. Константы магнитострикции  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  вдоль кристаллографических осей [100] и [111] для сплавов Fe—Al при  $T=20^\circ\text{C}$ :

1 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы; 2 — охлажденные с промежуточной скоростью, частично упорядоченные сплавы; 3 — закаленные, неупорядоченные сплавы [64]

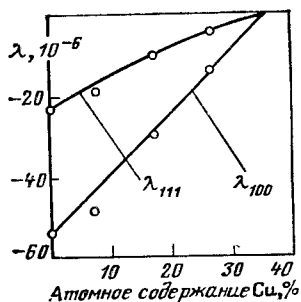


Рис. 27.54. Константы магнитострикции  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  сплавов Ni—Cu при  $T=20^\circ\text{C}$  [77]

**27.3.2. Сплавы на основе f-элементов.** При всем многообразии сплавов редкоземельных элементов приведены данные только для трех характерных систем интерметаллидов (R — редкоземельный элемент):  $\text{RFe}_2$ ,  $\text{RCO}_5$  и  $\text{R}_2\text{Co}_{17}$  (табл. 27.13, 27.14 и рис. 27.55—27.68). Материалы на их основе находят применение в технике. Более полная информация о свойствах этих веществ содержится в [43]. Данные о некоторых ферромагнитных соединениях и сплавах актиноидов приведены в табл. 27.15, 27.16.

Таблица 27.13. Магнитные моменты насыщения, температуры Кюри и температуры компенсации интерметаллидов (пространственная группа  $Fd3m$ ) [43]

| Соединение        | $n$ , p.e. | $T_C$ , К | $T_{\text{комп}}$ , К |
|-------------------|------------|-----------|-----------------------|
| $\text{YFe}_2$    | 2,78—3,1   | 535—554   | —                     |
| $\text{CeFe}_2$   | 2,38—2,59  | 221—240   | —                     |
| $\text{SmFe}_2$   | 2,50—2,8   | 676—700   | —                     |
| $\text{GdFe}_2$   | 2,8—3,75   | 785—810   | —                     |
| $\text{TbFe}_2^*$ | 3,68—5,8   | 696—711   | —                     |
| $\text{DyFe}_2$   | 4,9—7,31   | 633—638   | —                     |
| $\text{HoFe}_2^*$ | 5,1—6,67   | 597—614   | —                     |
| $\text{ErFe}_2^*$ | 4,75—5,85  | 590—595   | 480—490               |
| $\text{TmFe}_2$   | 2,52—2,7   | 566—610   | 255—248               |
| $\text{YbFe}_2$   | 1,8—2,3    | —         | 31                    |
| $\text{LuFe}_2$   | 2,70—2,97  | 558—610   | —                     |

\* Ферромагнитная структура.

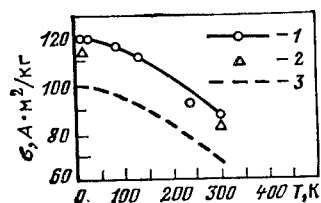


Рис. 27.55. Температурные зависимости удельной намагниченности сплава  $\text{TbFe}_2$  [49]:

1 — монокристалл, ось [111]; 2 — поликристалл в поле с индукцией 12 Тл [49]; 3 — поликристалл [42]

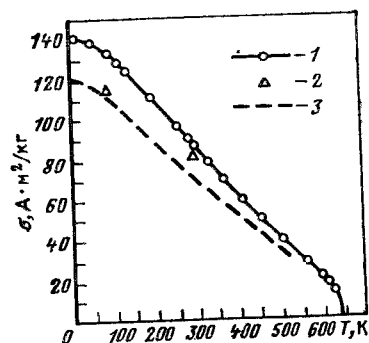


Рис. 27.56. Температурные зависимости удельного магнитного момента сплава  $\text{DyFe}_2$  [49]:

1 — монокристалл, ось [100]; 2 — поликристалл в поле с индукцией 12 Тл [49]; 3 — поликристалл [42]

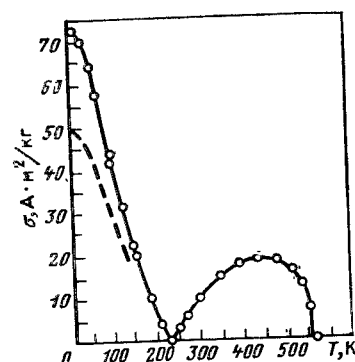


Рис. 27.57. Температурные зависимости удельного магнитного момента сплава  $\text{TmFe}_2$  [49]:

сплошная кривая — монокристалл, ось [111] [49]; пунктир — поликристалл [42]

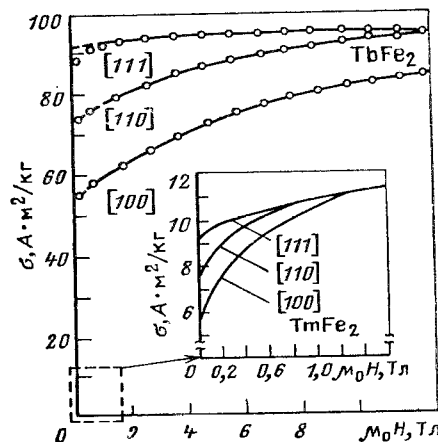


Рис. 27.58. Кривые намагничивания  $\text{TbFe}_2$  и  $\text{TmFe}_2$  при  $T=20^\circ\text{C}$  [29, 47]

Таблица 27.14. Магнитные свойства  
и постоянные решетки интерметаллидов  $RCO_5$   
(пространственная группа  $Pb/mmm$ ) [22, 43]

| Соедине-<br>ние | $a$ , нм | $c$ , нм | $\rho$ , $10^3$<br>кг/м <sup>3</sup> | $n$ , $\mu_B$ | $T_C$ , К      | $T_{комп.}$<br>К |
|-----------------|----------|----------|--------------------------------------|---------------|----------------|------------------|
| $YCo_5^{*1}$    | 0,4941   | 0,3971   | 7,60                                 | 6,8—8,2       | 977—<br>997    | —                |
| $LaCo_5$        | 0,5052   | 0,3970   | 8,03                                 | 7,3           | 840            | —                |
| $CeCo_5^{*1}$   | 0,4923   | 0,4019   | 8,57                                 | 5,7—7,4       | 737            | —                |
| $PrCo_5$        | 0,5013   | 0,3988   | 8,32                                 | 9,9—10,0      | 912            | —                |
| $NdCo_5^{*1}$   | 0,5015   | 0,3982   | 8,39                                 | 9,5—11,7      | 910            | —                |
| $SmCo_5$        | 0,5001   | 0,3970   | 8,53                                 | 6,0—6,8       | 1020           | —                |
| $GdCo_5$        | 0,4974   | 0,3971   | 8,86                                 | 1,2—1,5       | 1008—<br>—1020 | —                |
| $TbCo_5^{*2}$   | 0,4951   | 0,3978   | 8,91                                 | 0,57—0,8      | 980            | 99—<br>—120      |
| $DyCo_5^{*2}$   | 0,4910   | 0,3996   | 9,15                                 | 0,7—1,5       | 966            | 93—              |
| $HoCo_5^{*2}$   | 0,4888   | 0,4003   | 9,13                                 | 1,1—2,0       | 1000—<br>—1066 | —170<br>71       |
| $ErCo_5^{*2}$   | 0,4873   | 0,4003   | 9,03                                 | 0,46—2,1      | 986—<br>—1123  | —                |
| $TmCo_5$        | —        | —        | —                                    | 1,5—1,9       | 1020           | —                |

\*1 Ферромагнитная структура.

\*2 Ферримагнитная структура.

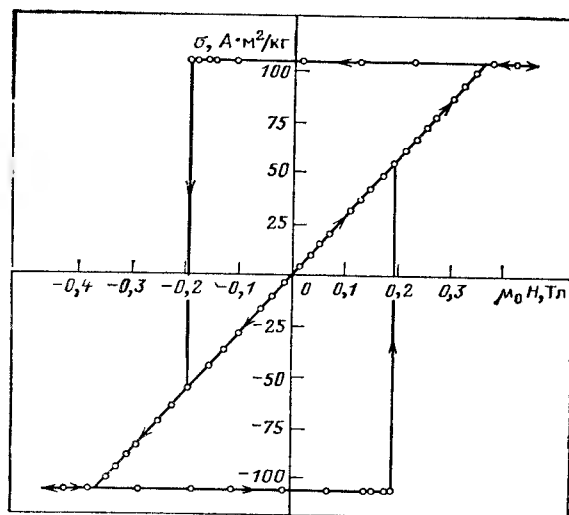


Рис. 27.60. Кривая намагничивания и петля гистерезиса монокристаллического образца  $SmCo_{5,3}$ , снятые вдоль оси  $c$  при  $T=20^\circ C$  после травления и электрополировки. Амплитудное значение индукции равно 3,0 Тл [19]

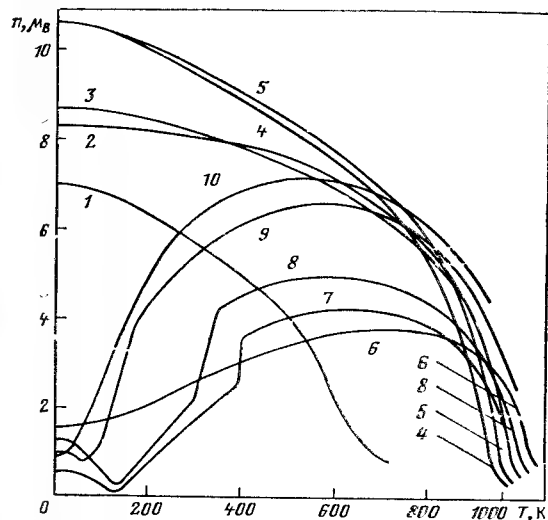


Рис. 27.59. Температурные зависимости атомных магнитных моментов в расчете на формульную единицу соединений  $RCO_5$ :

1 —  $CeCo_5$ ; 2 —  $YCo_5$ ; 3 —  $SmCo_5$ ; 4 —  $NdCo_5$ ; 5 —  $PrCo_5$ ; 6 —  $GdCo_5$ ; 7 —  $TbCo_5$ ; 8 —  $DyCo_5$ ; 9 —  $HoCo_5$ ; 10 —  $ErCo_5$  [21]

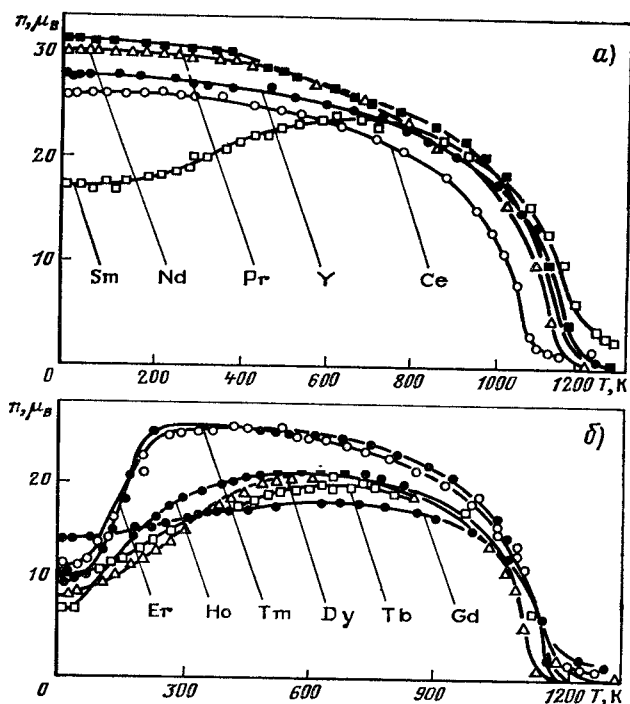


Рис. 27.61. Температурные зависимости атомных магнитных моментов, приходящихся на формульную единицу соединений  $R_2Co_{17}$  с легкими лантаноидами и иттрием (а) и с тяжелыми лантаноидами (б). Измерено в поле с индукцией 2 Тл [76]

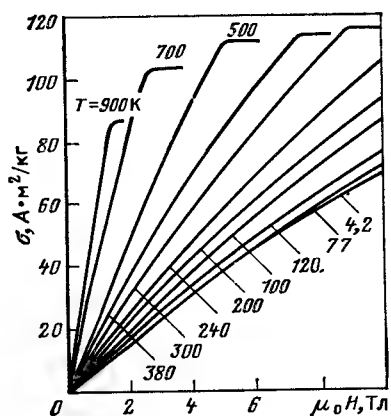


Рис. 27.62. Кривые намагничивания монокристалла  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  в направлении кристаллографической оси [100] при различных температурах [24]

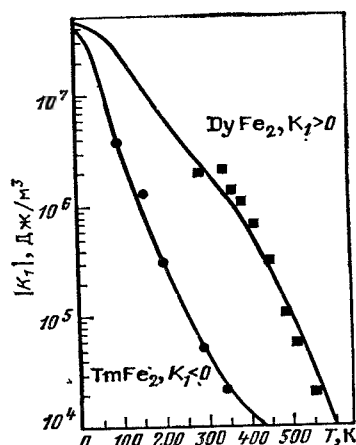


Рис. 27.63. Температурные зависимости абсолютного значения константы магнитной анизотропии  $K_1$  для  $\text{DyFe}_2$  и  $\text{TmFe}_2$  [49]

Таблица 27.15. Магнитные свойства и постоянные решетки ферромагнитных монохалькогенидов и монопниктидов актиноидов (пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ ) [107]

| Соединение | Постоянная решетки, нм | $T_C$ , К | $\Theta_p$ , К | $\mu_{эф}$ , $\mu_B$ | $n$ , $\mu_B$ |
|------------|------------------------|-----------|----------------|----------------------|---------------|
| US         | 0,5487—0,5490          | 172—180   | 173—180        | 2,22—2,31            | 1,20—1,76     |
| USE        | 0,571—0,575            | 160,5—187 | 188            | 2,51                 | 1,31—2,0      |
| UTe        | 0,6146—0,6161          | 102—110   | 104            | 2,84                 | 1,10—2,20     |
| NpN        | 0,4898                 | 82—100    | 82—100         | 2,13—2,44            | 1,4—2,2       |
| PuP        | 0,5651                 | 125       | 130            | 1,06                 | 0,42—0,77     |
| PuAs       | 0,586                  | 129       | 129            | 0,97                 | 0,35          |
| PuSb       | 0,6240                 | 85        | 90             | 1,0                  | 0,57          |
| CmN        | 0,5027—0,5041          | 109       | —              | 7,02                 | —             |
| CmAs       | 0,5905                 | 88—140    | —              | 6,58                 | —             |

Таблица 27.16. Магнитные свойства и кристаллическая структура некоторых ферромагнитных интерметаллидов актиноидов [107]

| Соединение         | Кристаллическая структура         |                                           | $T_C$ , К | $\Theta_p$ , К | $\mu_{эф}$ , $\mu_B$ | $n$ , $\mu_B$                 |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|-----------|----------------|----------------------|-------------------------------|
|                    | Сингония, пространственная группа | Параметры решетки, нм                     |           |                |                      |                               |
| $\text{ThCo}_5$    | Гексагональная, $P6/mmm$          | $a = 0,476$<br>$c = 3,649$                | 410—740   | —              | —                    | 5—8                           |
| $\text{UCo}_{5,3}$ | Ромбоэдрическая, $R\bar{3}m$      |                                           | 360       | —              | —                    | 2,4                           |
| $\text{UFe}_2$     | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,758                                     | 160—162   | 170            | 2,0—3,0              | 0,06 (U); 0,59 (Fe); 1,09 (Σ) |
| $\text{UNi}_2$     | Гексагональная, $P6_3/mmc$        | $a = 0,406$<br>$c = 0,825$                | 30        | 45             | 2,5                  | 0,12                          |
| $\text{UPt}$       | Орторомбическая, $Cmcm$           | $a = 0,372$<br>$b = 1,077$<br>$c = 0,441$ | 27—30     | —              | 2,62                 | 0,07—0,52                     |
| $\text{NpFe}_2$    | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,7144                                    | 492—500   | 523            | 4,2                  | 1,09 (Np); 1,35 (Fe); 2,6 (Σ) |
| $\text{NpAl}_2$    | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,7785                                    | 56        | 56             | 2,3                  | 1,5                           |
| $\text{NpMn}_2$    | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,7230                                    | 18        | —              | —                    | 0,3—0,4                       |
| $\text{NpNi}_2$    | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,7098                                    | 28—32     | 20             | —                    | 1,2                           |
| $\text{NpOs}_2$    | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,7528                                    | 7,5—8     | —110           | 2,3                  | 0,4                           |
| $\text{PuFe}_2$    | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,7190                                    | 564—600   | 599            | 3,7                  | 0,45 (Pu); 1,47 (Fe); 2,3(Σ)  |
| $\text{AmFe}_2$    | Кубическая, $Fd\bar{3}m$          | 0,730                                     | 350—400   | —              | 4                    | 2,8                           |

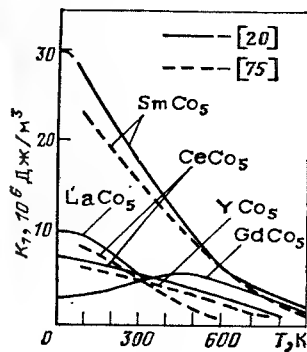


Рис. 27.64. Температурные зависимости константы магнитной анизотропии  $K_1$  в сплавах  $RCo_5$  [43]

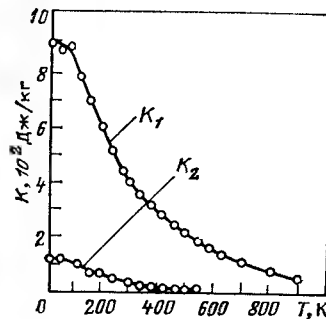


Рис. 27.65. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии в соединении  $Sm_2Co_{17}$  [17]

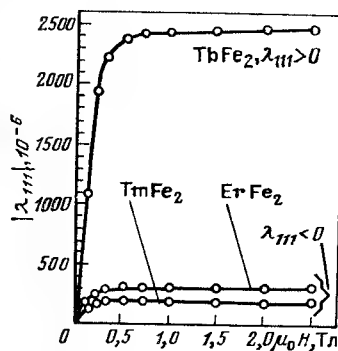


Рис. 27.66. Абсолютное значение константы магнитострикции  $|\lambda_{111}|$  монокристаллов  $TbFe_2$ ,  $ErFe_2$  и  $TmFe_2$  при комнатной температуре [29, 47]

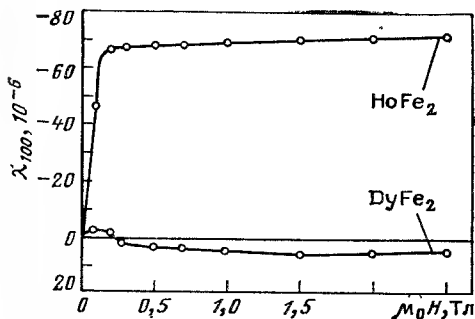


Рис. 27.67. Константа магнитострикции  $\lambda_{100}$  монокристаллов  $DyFe_2$  и  $HoFe_2$  при  $T=20^\circ C$  [50]

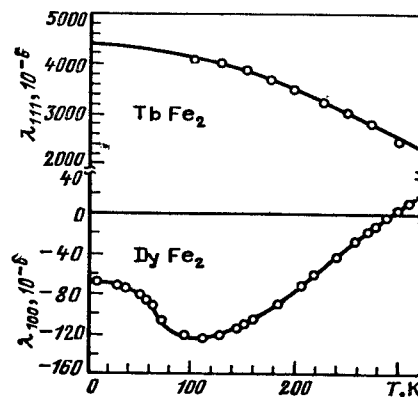


Рис. 27.68. Температурные зависимости констант магнитострикции монокристаллов  $TbFe_2$  и  $DyFe_2$  [48]

## 27.4. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**27.4.1. Магнитомягкие материалы.** Материалы с наибольшей намагниченностью насыщения. К этой группе материалов принадлежат сорта железа с минимальным количеством примесей (табл. 27.17, 17.18), нелегированные электротехнические стали (табл. 27.19, 27.20), сплавы на основе системы  $Fe-Co$  (рис. 27.69—27.72, табл. 27.21, см. также рис. 27.39, 27.45, 27.50, табл. 27.7), в том числе пермендюр (массовый состав 49%  $Co$ , 2%  $V$ , остальное  $Fe$ ).

Первая цифра в марках железокобальтовых и железоникелевых сплавов в табл. 27.21 (см. также табл. 27.31) указывает на процентное содержание (по массе) соответственно кобальта (буква К) и никеля (буква Н), следующая цифра — на содержание легирующего элемента — хрома (Х), ванадия (Ф), молибдена (М).

Цифры в пятизначных марках нелегированных электротехнических сталей означают: первая — вид обработки давлением и структурное состояние (1 — горячекатаная и кованая, 2 — калиброванная); вторая — содержание кремния (0 — сталь нелегированная, без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с заданным коэффициентом старения); третья — основную нормируемую характеристику (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая — значение основной нормируемой характеристики (коэрцитивная сила в целых единицах  $A/m$ ).

Данные этого параграфа, если не указано другое, соответствуют комнатной температуре, т. е.  $20^\circ C$ .



Таблица 27.17. Химический состав некоторых сортов железа [3]

| Сорт                                                             | Массовое содержание, % |           |          |             |             |         |       |       |
|------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------|----------|-------------|-------------|---------|-------|-------|
|                                                                  | C                      | Si        | Mn       | P           | S           | O       | N     | Al    |
| Кипящая низкоуглеродистая электротехническая сталь (арм-ко) [46] | 0,015                  | 0,003     | 0,030    | 0,005       | 0,025       | 0,15    | 0,007 | 0,003 |
| Электролитическое железо                                         | 0,01                   | 0,004     | 0,001    | 0,003       | 0,003       | —       | —     | 0,009 |
| Карбонильное железо                                              | 0,02—0,1               | 0,04—0,05 | 0,08—0,1 | 0,005—0,007 | 0,005—0,007 | 0,1—0,6 | 0,005 | —     |

Таблица 27.18. Магнитные свойства некоторых сортов железа высокой чистоты [46]

| Сорт                                         | $B_s$ , Тл | $H_c$ , А/м | Проницаемость |               |
|----------------------------------------------|------------|-------------|---------------|---------------|
|                                              |            |             | $\mu_r$ нач   | $\mu_r$ max   |
| Литое (плавка в вакууме)                     | —          | 22—27       | —             | 17 000—21 000 |
| Электролитическое (отжиг)                    | —          | 12—25       | 44—60         | 8100—41 500   |
| Электролитическое (плавка в вакууме и отжиг) | —          | 7,2         | 1150          | 61 000        |
| Ripon (отжиг в водорододе)                   | 2,16       | 4,0         | —             | 100 000       |

Таблица 27.19. Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали [14]\*

| Марка | $H_c$ , А/м | $\mu_r$ max, $10^3$ |
|-------|-------------|---------------------|
| 10895 | 95          | 3,0                 |
| 20895 |             |                     |
| 10880 | 80          | 4,0                 |
| 20880 |             |                     |
| 10864 | 64          | 4,5                 |
| 20864 |             |                     |
| 10848 | 48          | 4,8                 |
| 20848 |             |                     |
| 20832 | 32          | 5,0                 |

\* Массовое содержание, %: C  $\leq$  0,04; Si  $\leq$  0,3; Mn  $\leq$  0,3. Магнитная индукция  $B_H$ , Тл, при напряженности магнитного поля  $H$ , А/м, не менее:  $B_{500} = 1,38$ ;  $B_{1000} = 1,50$ ;  $B_{2500} = 1,62$ ;  $B_{5000} = 1,71$ ;  $B_{10000} = 1,81$ ;  $B_{20000} = 2,05$ .

Таблица 27.20. Магнитные свойства сортовой электротехнической нелегированной стали [9]\*

| Марка | $H_c$ , А/м | $B$ , Тл, при $H$ , А/м |      |      |
|-------|-------------|-------------------------|------|------|
|       |             | 500                     | 1000 | 2500 |
| 10895 | 95          | 1,32                    | 1,45 | 1,54 |
| 20895 |             |                         |      |      |
| 11895 |             |                         |      |      |
| 21895 |             |                         |      |      |
| 10880 | 80          | 1,36                    | 1,47 | 1,57 |
| 20880 |             |                         |      |      |
| 11880 |             |                         |      |      |
| 21880 |             |                         |      |      |
| 10864 | 64          | 1,40                    | 1,50 | 1,60 |
| 20864 |             |                         |      |      |
| 11864 |             |                         |      |      |
| 21864 |             |                         |      |      |

\* Массовое содержание, %: C  $\leq$  0,035; других примесей — до 0,95.

Таблица 27.21. Магнитные свойства холодиокатанных сплавов с высокой индукцией технического насыщения [8]

| Марка  | $B$ , Тл, при $H$ , А/м |           |           | $P$ , Вт/кг   |              |               | $H_c$ , А/м | $\mu_r$               |
|--------|-------------------------|-----------|-----------|---------------|--------------|---------------|-------------|-----------------------|
|        | 400                     | 2500      | 15 000    | $P_{1,5/400}$ | $T_{1,8/40}$ | $P_{2,0/400}$ |             |                       |
| 27КХ   | —                       | 1,75—1,80 | 2,05—2,15 | 80—100        | —            | —             | —           | —                     |
| 49К2ФА | 1,8—2,0                 | 2,1—2,2   | —         | —             | 25—39        | 30—55         | 40—140      | 5500                  |
| 49КФ   | —                       | 1,9—2,0   | 2,1—2,2   | —             | —            | —             | 160         | —                     |
| 49К2Ф  | —                       | —         | 2,25      | —             | —            | —             | 160         | 700 при $H = 0,8$ А/м |

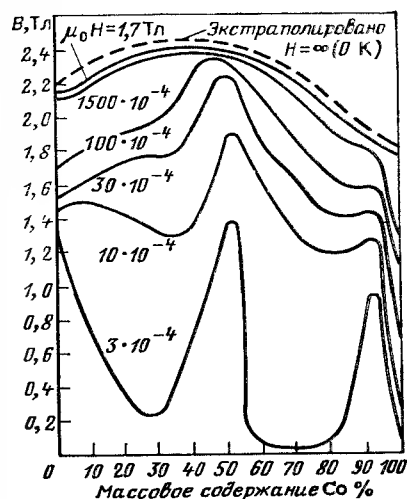


Рис. 27.69. Зависимости магнитной индукции в сплавах Fe—Со от содержания кобальта и индукции внешнего магнитного поля при  $T=20^\circ\text{C}$  [3]

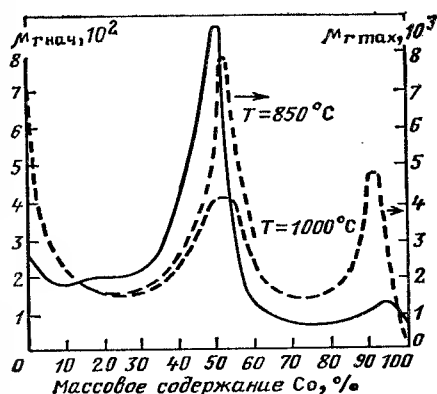


Рис. 27.70. Начальная и максимальная относительные магнитные проницаемости сплавов Fe—Со в зависимости от содержания кобальта и температуры отжига [3]

Материалы с малыми потерями при перемагничивании. В эту группу материалов входят многочисленные марки железоникелевых электротехнических сталей с массовым содержанием никеля от 0,4 до 5% (табл. 27.22—27.26, см. также рис. 27.40, 27.52 и табл. 27.7); сюда относится также ряд аморфных магнитных материалов (см. ниже).

Здесь приведены кривые намагничивания и зависимости удельных потерь при перемагничивании от амплитуды перемагничивающего поля для сталей (рис. 27.73—27.79).

Цифры в четырехзначных марках электротехнических сталей означают: первая — вид прокатки и структурное состояние (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизо-

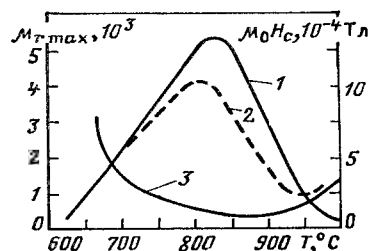


Рис. 27.71. Зависимости максимальной относительной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы пермендюра (массовый состав: 49% Fe, 49% Со, 2% V) от температуры отжига:

1 —  $\mu_{r\max}$  после быстрого охлаждения; 2 —  $\mu_{r\max}$  после медленного охлаждения; 3 —  $\mu_0 H_c$  после быстрого охлаждения [3]

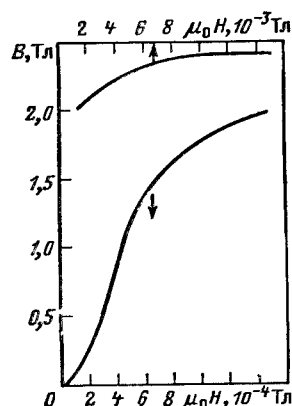


Рис. 27.72. Кривые намагничивания пермендюра (массовый состав: 49% Fe, 49% Со, 1,82% V) [3]

тропная с ребровой структурой); вторая — массовое содержание кремния, % [0 — до 0,4 (нелегированная). 1 — от 0,4 до 0,8, 2 — от 0,8 до 1,8, 3 — от 1,8 до 2,8, 4 — от 2,8 до 3,8, 5 — от 3,8 до 4,8]; третья — основную нормируемую характеристику (0 — удельные потери на  $B=1,7$  Тл, т. е.  $P_{1,7/50}$ ; 1 — удельные потери на частоте перемагничивающего поля 50 Гц при амплитуде  $B=1,5$  Тл, т. е.  $P_{1,5/50}$ ; 2 — удельные потери на частоте перемагничивающего поля 400 Гц при амплитуде  $B=1,0$  Тл, т. е.  $P_{1,0/400}$ ; 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при  $H=0,4$  А/м, т. е.  $B_{0,4}$ ; 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при  $H=10$  А/м, т. е.  $B_{10}$ ); четвертая — порядковый номер типа стали.

Тип стали определяется первыми тремя цифрами марки,

Таблица 27.22. Магнитные свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной анизотропной стали [15]

| Марка | Толщина, мм | P, Вт/кг, не более  |                     |                     | B, Тл, при H, А/м |      |      |
|-------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|------|------|
|       |             | P <sub>1,0/50</sub> | P <sub>1,5/50</sub> | P <sub>1,7/50</sub> | 100               | 250  | 2500 |
| 3411  | 0,50        | 1,10                | 2,45                | 3,20                | —                 | —    | 1,75 |
|       | 0,35        | 0,80                | 1,75                | 2,50                | —                 | —    | 1,75 |
| 3412  | 0,50        | 0,95                | 2,10                | 2,80                | —                 | —    | 1,85 |
|       | 0,35        | 0,70                | 1,50                | 2,20                | —                 | —    | 1,85 |
| 3413  | 0,50        | 0,80                | 1,75                | 2,50                | —                 | —    | 1,85 |
|       | 0,35        | 0,60                | 1,30                | 1,90                | —                 | —    | 1,85 |
|       | 0,30        | —                   | 1,19                | 1,75                | —                 | —    | 1,85 |
| 3414  | 0,50        | 0,70                | 1,50                | 2,20                | 1,60              | 1,70 | 1,88 |
|       | 0,35        | 0,50                | 1,10                | 1,60                | 1,60              | 1,70 | 1,88 |
|       | 0,30        | —                   | 1,03                | 1,50                | 1,60              | 1,70 | 1,88 |
|       | 0,28        | —                   | 1,05                | 1,55                | —                 | —    | 1,85 |
| 3415  | 0,35        | 0,46                | 1,03                | 1,50                | 1,61              | 1,71 | 1,90 |
|       | 0,28        | —                   | 0,95                | 1,38                | 1,61              | 1,71 | 1,90 |
| 3416  | 0,28        | —                   | 0,89                | 1,30                | 1,61              | 1,70 | 1,90 |

Таблица 27.23. Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной изотропной стали [16]

| Марка | Толщина, мм | P, Вт/кг, не более  |                     | B, Тл, при H, А/м |      |      |        |         |
|-------|-------------|---------------------|---------------------|-------------------|------|------|--------|---------|
|       |             | P <sub>1,0/50</sub> | P <sub>1,5/50</sub> | 1000              | 2500 | 5000 | 10 000 | 130 000 |
| 2011  | 0,65        | 3,8                 | 9,0                 | 1,48              | 1,60 | 1,70 | 1,80   | 2,02    |
|       | 0,50        | 3,5                 | 8,0                 | 1,49              | 1,60 | 1,70 | 1,80   | 2,02    |
| 2012  | 0,65        | 3,6                 | 8,0                 | 1,50              | 1,62 | 1,72 | 1,82   | 2,02    |
|       | 0,50        | 2,9                 | 6,5                 | 1,50              | 1,62 | 1,72 | 1,82   | 2,02    |
| 2013  | 0,65        | 3,1                 | 7,0                 | 1,53              | 1,64 | 1,74 | 1,85   | 2,05    |
|       | 0,50        | 2,5                 | 5,6                 | 1,54              | 1,65 | 1,75 | 1,85   | 2,05    |
| 2111  | 0,65        | 4,3                 | 10,0                | 1,45              | 1,58 | 1,66 | 1,75   | 2,00    |
|       | 0,50        | 3,5                 | 8,0                 | 1,46              | 1,58 | 1,67 | 1,78   | 2,00    |
| 2112  | 0,65        | 3,5                 | 8,0                 | 1,46              | 1,59 | 1,67 | 1,77   | 2,02    |
|       | 0,50        | 2,6                 | 6,0                 | 1,46              | 1,60 | 1,68 | 1,77   | 2,02    |
| 2211  | 0,65        | 3,0                 | 7,0                 | 1,40              | 1,56 | 1,65 | 1,73   | 1,96    |
|       | 0,50        | 2,6                 | 5,8                 | 1,40              | 1,56 | 1,65 | 1,76   | 2,00    |
| 2212  | 0,65        | 2,6                 | 6,3                 | 1,42              | 1,58 | 1,67 | 1,77   | 2,00    |
|       | 0,50        | 2,2                 | 5,0                 | 1,42              | 1,60 | 1,68 | 1,77   | 2,00    |
| 2311  | 0,65        | 2,5                 | 5,8                 | 1,36              | 1,52 | 1,62 | 1,72   | 1,96    |
|       | 0,50        | 1,9                 | 4,4                 | 1,38              | 1,54 | 1,64 | 1,74   | 1,96    |

Продолжение табл. 27.23

| Марка | Толщина, мм | P, Вт/кг, не более  |                     | B, Тл, при H, А/м |      |      |        |         |
|-------|-------------|---------------------|---------------------|-------------------|------|------|--------|---------|
|       |             | P <sub>1,0/50</sub> | P <sub>1,5/50</sub> | 1000              | 2500 | 5000 | 10 000 | 130 000 |
| 2312  | 0,65        | 2,4                 | 5,6                 | 1,38              | 1,54 | 1,64 | 1,72   | 1,96    |
|       | 0,50        | 1,75                | 4,0                 | 1,40              | 1,56 | 1,66 | 1,74   | 1,96    |
| 2411  | 0,50        | 1,6                 | 3,6                 | 1,37              | 1,49 | 1,60 | 1,73   | 1,96    |
|       | 0,35        | 1,3                 | 3,0                 | 1,37              | 1,50 | 1,60 | 1,70   | 1,95    |
| 2412  | 0,50        | 1,30                | 3,1                 | 1,35              | 1,50 | 1,60 | 1,70   | 1,95    |
|       | 0,35        | 1,15                | 2,5                 | 1,35              | 1,50 | 1,60 | 1,70   | 1,95    |

Таблица 27.24. Свойства тонколистовой электротехнической горячекатаной изотропной стали [10]

| Марка | Толщина, мм | P, Вт/кг, не более  |                     | B, Тл, при H, А/м |      |      |        |        |
|-------|-------------|---------------------|---------------------|-------------------|------|------|--------|--------|
|       |             | P <sub>1,0/50</sub> | P <sub>1,5/50</sub> | 1000              | 2500 | 5000 | 10 000 | 30 000 |
| 1211  | 1,00        | 5,8                 | 13,4                | —                 | 1,53 | 1,63 | 1,76   | 2,00   |
|       | 0,50        | 3,3                 | 7,7                 | —                 | 1,53 | 1,64 | 1,76   | 2,00   |
| 1212  | 1,00        | 5,4                 | 12,5                | —                 | 1,53 | 1,62 | 1,76   | 2,00   |
|       | 0,65        | 3,4                 | 8,0                 | —                 | 1,50 | 1,62 | 1,75   | 1,98   |
|       | 0,50        | 3,1                 | 7,2                 | —                 | 1,50 | 1,62 | 1,75   | 1,98   |
| 1213  | 1,00        | 4,7                 | 10,7                | —                 | 1,50 | 1,62 | 1,75   | 1,98   |
|       | 0,65        | 3,2                 | 7,5                 | —                 | 1,50 | 1,62 | 1,75   | 1,98   |
|       | 0,50        | 2,8                 | 6,5                 | —                 | 1,50 | 1,62 | 1,75   | 1,98   |
| 1311  | 0,50        | 2,5                 | 6,1                 | —                 | 1,48 | 1,59 | 1,73   | 1,95   |
| 1312  | 0,50        | 2,2                 | 5,3                 | —                 | 1,48 | 1,59 | 1,73   | 1,95   |
| 1313  | 0,50        | 2,1                 | 4,6                 | —                 | 1,48 | 1,59 | 1,73   | 1,95   |
| 1411  | 0,50        | 2,0                 | 4,4                 | —                 | 1,46 | 1,57 | 1,72   | 1,94   |
|       | 0,35        | 1,6                 | 3,6                 | —                 | 1,46 | 1,57 | 1,71   | 1,92   |
| 1412  | 0,50        | 1,8                 | 3,9                 | —                 | 1,46 | 1,57 | 1,71   | 1,92   |
|       | 0,35        | 1,4                 | 3,2                 | —                 | 1,46 | 1,57 | 1,71   | 1,92   |
| 1413  | 0,50        | 1,55                | 3,5                 | —                 | 1,48 | 1,59 | 1,73   | 1,94   |
|       | 0,35        | 1,35                | 3,0                 | —                 | 1,48 | 1,59 | 1,73   | 1,94   |
| 1511  | 0,50        | 1,55                | 3,5                 | 1,30              | 1,46 | 1,57 | 1,70   | 1,90   |
|       | 0,35        | 1,35                | 3,0                 | 1,30              | 1,46 | 1,57 | 1,70   | 1,90   |
| 1512  | 0,50        | 1,40                | 3,1                 | 1,29              | 1,45 | 1,56 | 1,69   | 1,89   |
|       | 0,35        | 1,20                | 2,8                 | 1,29              | 1,45 | 1,56 | 1,69   | 1,89   |
| 1513  | 0,50        | 1,25                | 2,9                 | 1,29              | 1,44 | 1,55 | 1,69   | 1,89   |
|       | 0,35        | 1,05                | 2,5                 | 1,29              | 1,44 | 1,55 | 1,69   | 1,89   |
| 1514  | 0,50        | 1,15                | 2,7                 | 1,29              | 1,44 | 1,55 | 1,69   | 1,89   |
|       | 0,35        | 0,90                | 2,2                 | 1,29              | 1,44 | 1,55 | 1,69   | 1,89   |

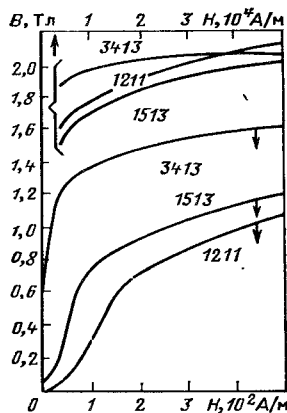


Рис. 27.73. Кривые намагничивания электротехнических сталей разных марок [25]

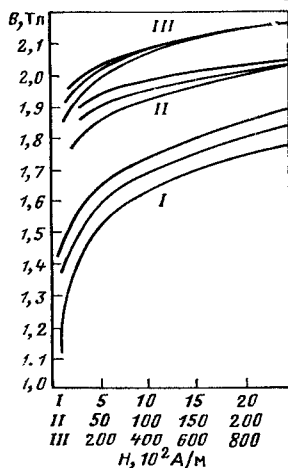


Рис. 27.74. Кривые намагничивания электротехнических сталей марок 3411 (нижние), 3412 (средние), 3413 (верхние)

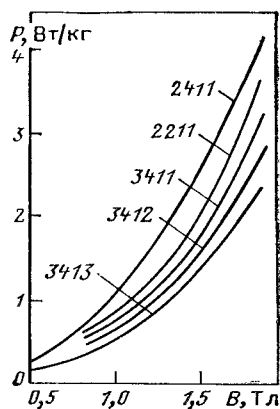


Рис. 27.75. Зависимость удельных потерь от амплитуды перемагничивающего поля при перемагничивании электротехнических сталей разных марок [25]

Таблица 27.25. Магнитные свойства стали марки 1521 [10]

| Толщина, мм | P, Вт/кг              |                      | B, Тл, при H, А/м |      |      |
|-------------|-----------------------|----------------------|-------------------|------|------|
|             | P <sub>0,75/400</sub> | P <sub>1,0/400</sub> | 500               | 1000 | 2500 |
| 0,35        | 10,7                  | 19                   | 1,21              | 1,30 | 1,44 |
| 0,22        | 8,0                   | 14,0                 | 1,20              | 1,29 | 1,42 |
| 0,2         | 7,2                   | 12,5                 | 1,20              | 1,29 | 1,42 |
| 0,1         | 6                     | 10,5                 | 1,19              | 1,28 | 1,40 |

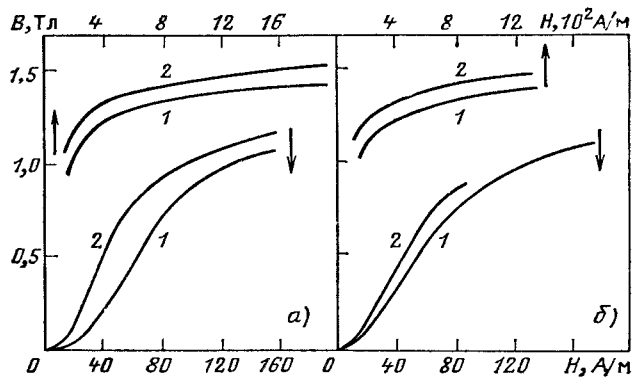


Рис. 27.76. Кривые намагничивания электротехнической стали марки 1521 при толщине образца 0,35 мм (а) и 0,2 мм (б). На частоте перемагничивающего поля 400 Гц (1) и 50 Гц (2) [25]

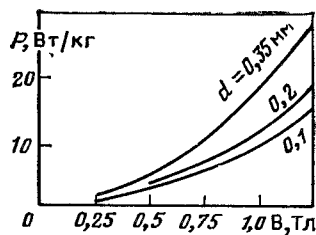


Рис. 27.77. Зависимость удельных потерь при перемагничивании электротехнической стали марки 1521 от амплитуды магнитной индукции при различной толщине образцов [25]

Таблица 27.26. Магнитные свойства ленты холоднокатаной рулонной анизотропной стали [11]

| Марка | Толщина, мм | Р, Вт/кг             |                      | $H_c$ , А/м, не более | В, Тл, при H, А/м |      |      |      |      |      |
|-------|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|------|------|------|------|------|
|       |             | $P_{1,0/400}$        | $P_{1,5/400}$        |                       | 40                | 80   | 200  | 400  | 1000 | 2500 |
| 3421  | 0,20        | —                    | —                    | 28                    | 0,50              | 0,85 | 1,10 | 1,35 | 1,45 | 1,70 |
|       | 0,15        | 10,0                 | 23,0                 | 34                    | 0,50              | 0,80 | 1,10 | 1,30 | 1,45 | 1,70 |
|       | 0,08        | 10,0                 | 22,0                 | 36                    | 0,40              | 0,75 | 1,10 | 1,25 | 1,45 | 1,70 |
|       | 0,05        | 10,0                 | 21,0                 | 36                    | 0,40              | 0,75 | 1,10 | 1,25 | 1,45 | 1,70 |
| 3422  | 0,15        | 9,0                  | 20,0                 | 32                    | 0,60              | 0,95 | 1,25 | 1,40 | 1,55 | 1,75 |
|       | 0,08        | 8,5                  | 19,0                 | 32                    | 0,55              | 0,90 | 1,25 | 1,35 | 1,55 | 1,75 |
|       | 0,05        | 8,5                  | 19,0                 | 36                    | 0,55              | 0,90 | 1,25 | 1,35 | 1,55 | 1,75 |
| 3423  | 0,15        | 8,0                  | 19,0                 | 26                    | 0,80              | 1,10 | 1,40 | 1,55 | 1,65 | 1,82 |
|       | 0,08        | 7,5                  | 17,0                 | 28                    | 0,80              | 1,05 | 1,40 | 1,50 | 1,65 | 1,82 |
|       | 0,05        | —                    | 17,0                 | —                     | 0,80              | 1,05 | 1,40 | 1,50 | 1,65 | 1,82 |
| 3424  | 0,15        | —                    | 18,0                 | —                     | 0,80              | 1,10 | 1,40 | 1,55 | 1,65 | 1,82 |
|       | 0,08        | —                    | 16,0                 | —                     | 0,80              | 1,10 | 1,40 | 1,55 | 1,65 | 1,82 |
|       | 0,05        | 7,5                  | 16,0                 | 32                    | 0,80              | 1,10 | 1,40 | 1,55 | 1,65 | 1,82 |
| 3425  | 0,15        | —                    | 17,0                 | —                     | 1,10              | 1,35 | 1,50 | 1,65 | 1,75 | 1,82 |
|       | 0,08        | —                    | 15,0                 | —                     | 1,05              | 1,30 | 1,50 | 1,65 | 1,75 | 1,82 |
|       | 0,05        | —                    | 15,0                 | —                     | 1,05              | 1,30 | 1,50 | 1,65 | 1,75 | 1,82 |
| 3411  | 0,20        | $P_{1,7/400}$<br>2,2 | $P_{1,5/400}$<br>1,5 | 28                    | 0,50              | 0,85 | 1,10 | 1,35 | 1,45 | 1,70 |

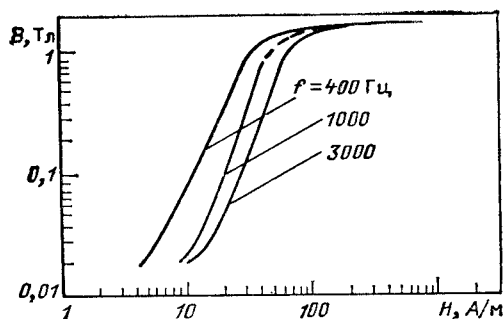


Рис.27.78. Кривые намагничивания ленты из стали марки 3424 толщиной 0,08 мм при различных частотах перемагничивающего поля [25]

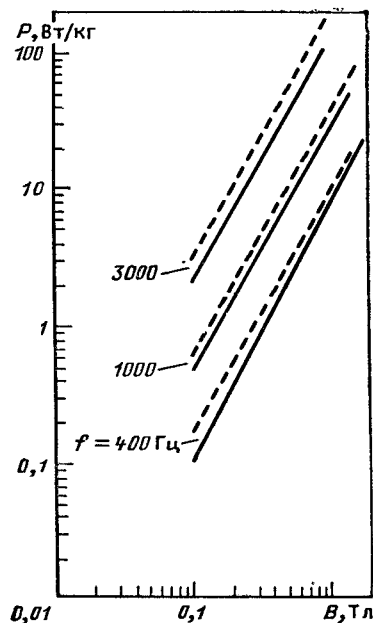


Рис. 27.79. Зависимости потерь от амплитуды магнитной индукции для ленты из стали марки 3424 при различных частотах перемагничивающего поля:

сплошные линии — толщина ленты 0,08 мм, пунктир — 0,15 мм [25]

Материалы с наибольшей проникаемостью в слабых полях. Наибольшей проникаемостью в слабых полях обладают некоторые марки электротехнических сталей (табл. 27.27, рис. 27.80) и железоникелевые сплавы, так называемые пермаллои

(табл. 27.28, рис. 27.81—27.83, см. также рис. 27.38, 27.44, 27.48, 27.49), а также некоторые аморфные материалы (см. ниже). Подробные данные об этих сплавах можно найти в справочнике [28].

Таблица 27.27. Магнитные свойства электротехнических сталей с наибольшей проницаемостью в слабых полях [10] (удельное электрическое сопротивление  $6 \cdot 10^{-7}$  Ом·м)

| Марка | Толщина,<br>мм | B, Тл, не менее, при H, А/м |         |         |
|-------|----------------|-----------------------------|---------|---------|
|       |                | 0,2                         | 0,4     | 0,8     |
| 1561  | 0,35           | 0,00010                     | 0,00022 | 0,00065 |
|       | 0,20           | 0,00010                     | 0,00023 | 0,00060 |
|       | 0,35           | 0,00012                     | 0,00028 | 0,00076 |
|       | 0,20           | 0,00012                     | 0,00030 | 0,00075 |

| Марка | Толщина, мм | 10    | 20   | 50   | 70   | 100  | 200  | 500  | 1000 |
|-------|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1571  | 0,20        | 0,030 | 0,10 | 0,38 | 0,58 | 0,66 | 0,90 | 1,18 | 1,29 |
|       | 0,35        | 0,035 | 0,14 | 0,48 | 0,61 | 0,77 | 0,92 | 1,21 | 1,30 |
| 1572  | 0,20        | 0,040 | 0,14 | 0,48 | 0,62 | 0,74 | 0,92 | 1,20 | 1,29 |
|       | 0,35        | 0,045 | 0,17 | 0,57 | 0,71 | 0,87 | 1,02 | 1,25 | 1,30 |

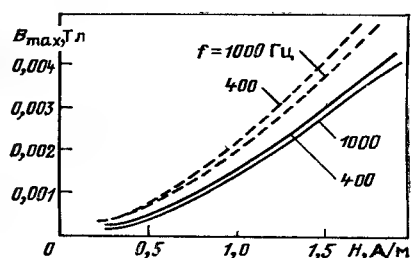


Рис. 27.80. Зависимости максимальной индукции от действующего значения напряженности поля для сталей марок 1561 (пунктир) и 1562 (сплошные кривые) на частотах перемагничивающего поля 400 и 1000 Гц [27]

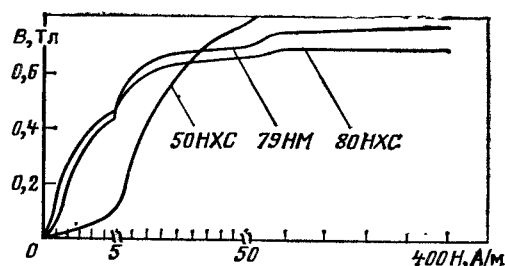


Рис. 27.81. Кривые намагничивания сплавов различных марок [27]

Таблица 27.28. Магнитные свойства некоторых железоникелевых сплавов [8]

| Марка | Толщина или диаметр, мм | Проницаемость |             | $H_c$ , А/м | $B_s$ , Тл |
|-------|-------------------------|---------------|-------------|-------------|------------|
|       |                         | $\mu_r$ нач   | $\mu_r$ max |             |            |
| 45Н   | 0,02—0,04               | 1700          | 16 000      | 32          | 1,5        |
|       | 0,35—2,5                | 2800          | 25 000      | 16          |            |
|       | 3—22                    | 2000          | 18 000      | 24          |            |
| 65НП  | 0,02—0,04               | 300—1500      | 70 000      | 6,4         | 1,3        |
|       | 0,10—0,18               | 500—2000      | 200 000     | 2,8         |            |
|       | 0,35—0,50               | 500—2000      | 300 000     | 2,4         |            |
|       | 0,005                   | 10 000        | 35 000      | 6,4         |            |
| 79НМ  | 0,1—0,15                | 22 000        | 150 000     | 1,2         | 0,73—0,75  |
|       | 1,5—2,0                 | 25 000        | 180 000     | 1,2         |            |
|       | 3—22                    | 20 000        | 80 000      | 3,2         |            |
| 50НХС | 0,02—0,04               | 1500          | 15 000      | 20          | 1,0        |
|       | 0,1—0,18                | 2500          | 25 000      | 13          |            |
|       | 0,55—1,0                | 3000          | 20 000      | 10          |            |
| 80НХС | 0,005                   | 8000          | 30 000      | 8           | 0,63       |
|       | 0,1—0,15                | 22 000        | 120 000     | 2,4         |            |
|       | 1,5—2,5                 | 25 000        | 150 000     | 1,2         |            |
|       | 3—22                    | 20 000        | 70 000      | 3,2         |            |

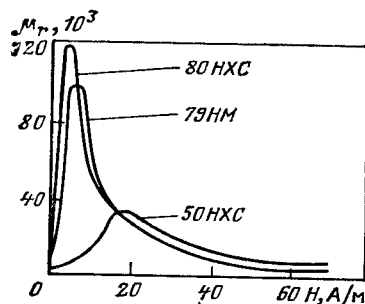


Рис. 27.82. Зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности поля для сплавов различных марок [27]

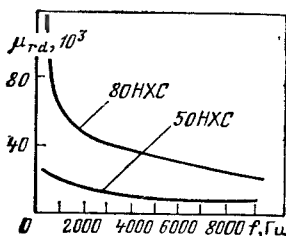


Рис. 27.83. Зависимости относительной магнитной проницаемости от частоты перемещающегося поля для сплавов различных марок [27]

Аморфные магнитные материалы. Особую группу магнитомягких материалов образуют аморфные металлические материалы, получаемые с помощью специальных технологий. Известны два типа таких материалов: аморфные сплавы металлов группы железа (см. п. 27.3.1) с добавкой 10–20% (атомное содержание) таких металлоидов, как В, С, N, Si, Р, и аморфные сплавы переходных металлов с редкоземельными. Приводятся данные только о материалах первого типа (табл. 27.29, 27.30), так как они находят применение в качестве материалов с малыми потерями при перемагничивании и большой магнитной проницаемостью в слабых полях (см. выше). Данные о материалах второго типа можно найти в [56]. Результаты, изложенные в этом параграфе, взяты из [82]. Аморфные сплавы отечественного производства описаны в справочнике [28].

На рис. 27.84–27.87 даны графики зависимостей спонтанного магнитного момента и индукции насыщения от состава сплавов и температуры, а также температуры Кюри от состава сплавов. На рис. 27.84 и 27.86 величина  $N$ , отложенная на оси абсцисс, соответствует составу сплавов. Рисунок 27.88 дает представление о магнитострикции в материалах разных составов. На рис. 27.89, 27.90 приведены важные для применений характеристики начальной проницаемости и потерь при перемагничивании.

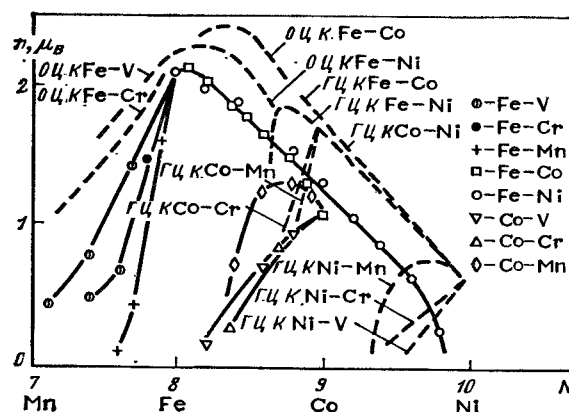


Рис. 27.84. Атомные магнитные моменты (в расчете на атом переходного элемента) квазибинарных аморфных сплавов  $(L_x M_{1-x})_{80} P_{10} B_{10}$  (L, M — переходные элементы) — сплошные кривые, соединяющие экспериментальные точки:

$N$  — среднее число внешних  $s$ - и  $d$ -электронов в атомах переходных элементов; пунктир — результаты для соответствующих кристаллических сплавов, не содержащих Р и В [82]

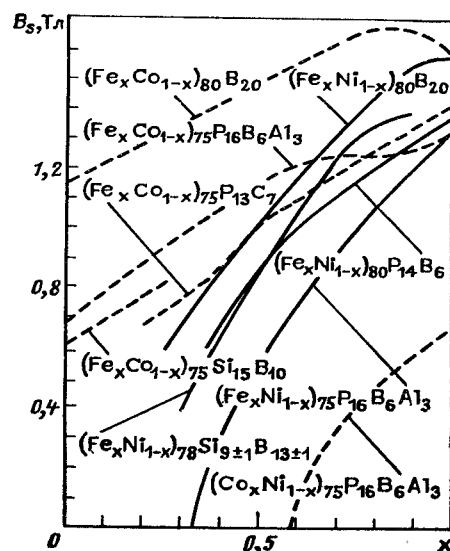


Рис. 27.85. Зависимости индукции насыщения при  $T = 20^\circ\text{C}$  от состава аморфных сплавов Fe, Co и Ni [82]

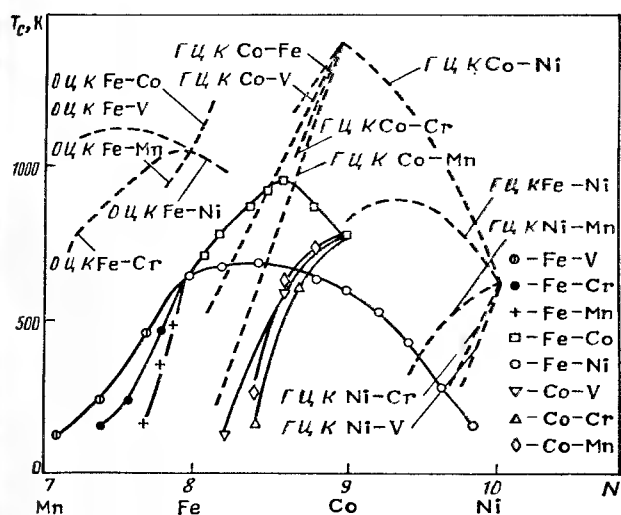


Рис. 27.86. Температуры Кюри квазибинарных аморфных сплавов  $(L_xM_{1-x})_{80}P_{10}B_{10}$  (L и M — переходные элементы) в зависимости от среднего числа  $N$  внешних  $s$ - и  $d$ -электронов атомов переходных элементов — сплошные кривые; пунктирные кривые — данные для кристаллических сплавов, не содержащих P и B [82]

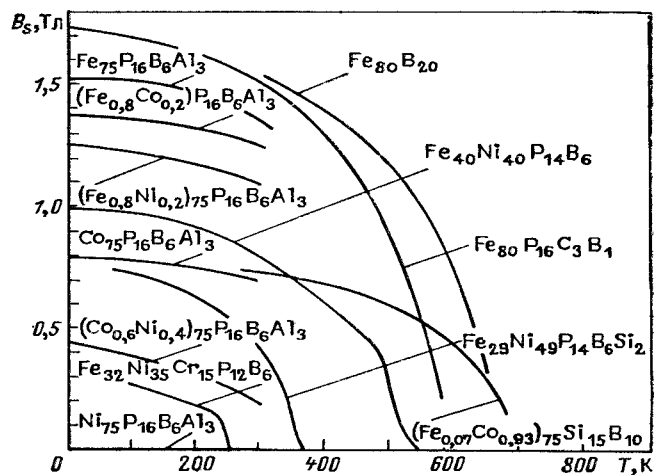


Рис. 27.87. Температурные зависимости индукции насыщения для различных аморфных сплавов (см. табл. 27.29 и 27.30) [82]

Таблица 27.29. Статические магнитные свойства некоторых аморфных сплавов [82]

| Сплав                                                                                | Форма образца | Отожженные образцы      |           |                    | Неотожженные образцы    |           |                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------|-----------|--------------------|-------------------------|-----------|--------------------|
|                                                                                      |               | $\mu_0 H_c, 10^{-4}$ Тл | $J_r/J_s$ | $\mu_r \max, 10^3$ | $\mu_0 H_c, 10^{-4}$ Тл | $J_r/J_s$ | $\mu_r \max, 10^3$ |
| Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>                                                     | т             | —                       | —         | —                  | 0,075                   | 0,46      | —                  |
| Fe <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> P <sub>14</sub> B <sub>6</sub>                     | т             | 0,08                    | 0,51      | 100                | 0,04                    | 0,77      | 300                |
|                                                                                      | л             | 0,06                    | 0,45      | 58                 | 0,02                    | 0,71      | 275                |
|                                                                                      | л             | 0,010                   | 0,90      | —                  | 0,009                   | 0,89      | —                  |
|                                                                                      | т             | 0,05                    | 0,45      | 70                 | 0,01                    | 0,71      | 550                |
| Fe <sub>29</sub> Ni <sub>49</sub> P <sub>14</sub> B <sub>6</sub> Si <sub>2</sub>     | л             | 0,01                    | 0,8       | —                  | 0,03P                   | 0,995P    | —                  |
|                                                                                      | т             | 0,057                   | 0,54      | 46                 | 0,011                   | 0,70      | 310                |
| Fe <sub>3</sub> Co <sub>72</sub> P <sub>16</sub> B <sub>6</sub> Al <sub>3</sub>      | т             | 0,023                   | 0,45      | 120                | 0,013                   | 0,71      | 340                |
| Fe <sub>4.7</sub> Co <sub>70.3</sub> Si <sub>15</sub> B <sub>10</sub>                | л             | 0,013                   | 0,36      | 190                | 0,006                   | 0,63      | 700                |
|                                                                                      | л             | 0,01                    | 0,35      | 230                | 0,015                   | 0,82      | 370                |
| Fe <sub>80</sub> P <sub>13</sub> C <sub>7</sub>                                      | л             | 0,08                    | 0,42      | 74                 | 0,018                   | 0,36      | 280                |
|                                                                                      | т             | 0,12                    | 0,42      | 42                 | 0,06                    | 0,4       | 80                 |
| (Fe <sub>0.8</sub> Ni <sub>0.2</sub> ) <sub>75</sub> S <sub>10</sub> B <sub>12</sub> | л             | 0,04                    | 0,44      | 145                | 0,015                   | 0,93      | 800                |
| (Fe <sub>0.8</sub> Ni <sub>0.2</sub> ) <sub>75</sub> S <sub>8</sub> B <sub>14</sub>  | л             | 0,018                   | 0,41      | 300                | 0,006                   | 0,95      | 2000               |
| (Fe <sub>0.6</sub> Ni <sub>0.4</sub> ) <sub>75</sub> S <sub>8</sub> B <sub>14</sub>  | л             | 0,022                   | 0,44      | 210                | 0,006                   | 0,97      | 1700               |
| (Fe <sub>0.4</sub> Ni <sub>0.6</sub> ) <sub>75</sub> S <sub>8</sub> B <sub>14</sub>  | л             | 0,024                   | 0,46      | 120                | 0,005                   | 0,76      | 950                |
| Fe <sub>80</sub> P <sub>16</sub> C <sub>3</sub> B <sub>1</sub>                       | л             | 0,080                   | —         | —                  | 0,068                   | —         | —                  |
|                                                                                      | т             | 0,062                   | 0,40      | 96                 | 0,050                   | 0,42      | 130                |

Примечание. Здесь т — торонд, л — лента, P — образец отожжен под растяжением.



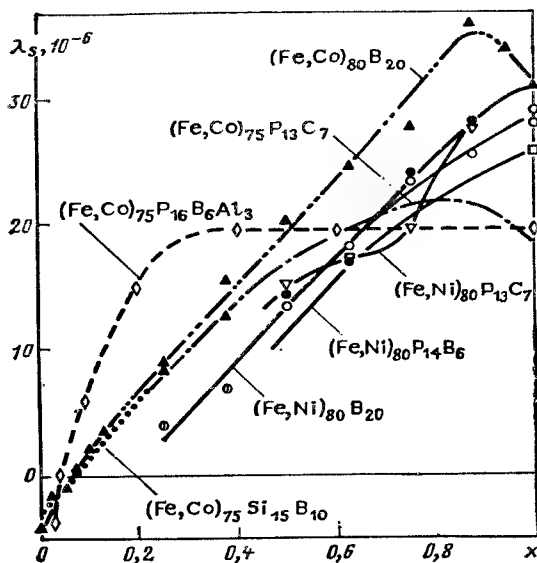


Рис. 27.88. Зависимости магнитострикции насыщения от состава некоторых аморфных сплавов  $(\text{Fe}_x\text{M}_{1-x})_{75-80}(\text{P, B, C})_{25-20}$  (здесь  $\text{M}—\text{Co}$  или  $\text{Ni}$ ) [82]

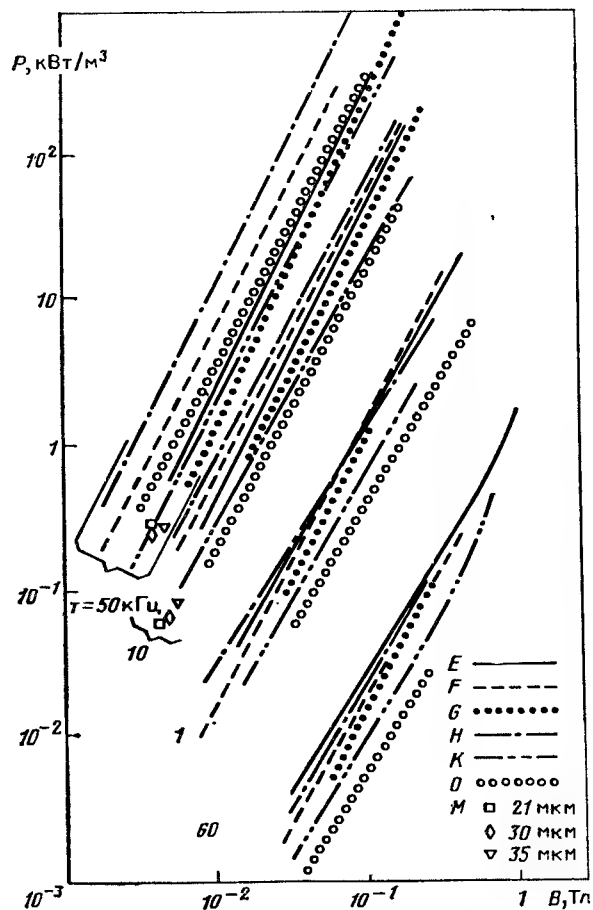


Рис. 27.90. Зависимости удельных потерь от амплитуды магнитной индукции для некоторых аморфных сплавов при различных частотах перемагничивающего поля. Буквенные обозначения сплавов соответствуют табл. 27.30. Толщины образцов 25—50 мкм [82]. Кривые около цифры 60 получены при частоте 60 Гц

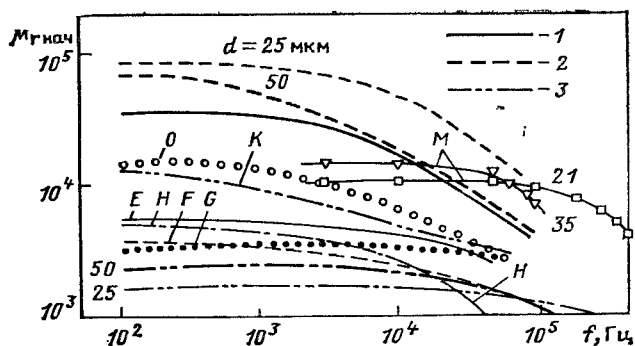


Рис. 27.89. Типичные зависимости относительной начальной магнитной проницаемости от частоты перемагничивающего поля для некоторых аморфных и поликристаллических сплавов при различной толщине образцов: данные для аморфных сплавов помечены буквами, соответствующими табл. 27.30; 1 и 2 — пермаллой (массовый состав: 4%  $\text{Mo}$ , 79%  $\text{Ni}$ , остальное  $\text{Fe}$ ) и супермаллой (массовый состав: 4%  $\text{Mo}$ , 80%  $\text{Ni}$ , остальное  $\text{Fe}$ , закругленная петля гистерезиса); 3 — силектрон (текстурованная электротехническая сталь, содержащая 3,2%  $\text{Si}$  по массе) [82]

Таблица 27.30. Удельные потери при перемагничивании в неотожженных и отожженных образцах аморфных сплавов [82]

| Сплав                                                            | Обозначение на рис. 27.89 и 27.90 | $10^3 \rho, \text{ кг/м}^3$ | Потери при $B_{\text{max}} = 0,1 \text{ Тл, кВт/м}^3$ |     |     |      |                                    |      |     |      | Толщина ленты, мкм | Отожженные образцы              |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|-----|-----|------|------------------------------------|------|-----|------|--------------------|---------------------------------|-----------|
|                                                                  |                                   |                             | Неотожженные образцы для частот, кГц                  |     |     |      | Отожженные образцы для частот, кГц |      |     |      |                    | $\mu_0 H_c, 10^{-4} \text{ Тл}$ | $J_r/J_s$ |
|                                                                  |                                   |                             | 0,060                                                 | 1   | 10  | 50   | 0,060                              | 1    | 10  | 50   |                    |                                 |           |
| $\text{Fe}_{90}\text{B}_{20}$                                    | —                                 | 7,39                        | 0,071                                                 | 2,8 | 65  | —    | 0,030                              | 1,1  | 18  | —    | 30—35              | 0,040                           | 0,78      |
|                                                                  | <i>E</i>                          | —                           | 0,10                                                  | 5   | 350 | 1000 | 0,025                              | 1,2  | 35  | 200  | 30                 | 0,075                           | 0,46      |
| $\text{Fe}_{40}\text{P}_{16}\text{C}_3\text{B}_1$                | —                                 | 7,7                         | —                                                     | 8,5 | 310 | —    | —                                  | 6,3  | 160 | —    | 40                 | 0,050                           | 0,42      |
| $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$            | —                                 | 7,5—7,7                     | —                                                     | 13  | 250 | —    | —                                  | 1,8  | 42  | —    | 50                 | 0,019                           | 0,58      |
|                                                                  | <i>K</i>                          | —                           | 0,07                                                  | 4   | 400 | 3000 | 0,010                              | 0,60 | 18  | 180  | 50                 | 0,020                           | 0,70      |
| $\text{Fe}_{29}\text{Ni}_{49}\text{P}_{14}\text{B}_6\text{Si}_2$ | —                                 | 7,51                        | —                                                     | 10  | 160 | —    | —                                  | 0,75 | 20  | —    | 70                 | 0,011                           | 0,70      |
| $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$                      | <i>F</i>                          | 7,14                        | 0,07                                                  | 4   | 450 | 2300 | 0,016                              | 1,2  | 45  | 600  | 30                 | 0,090                           | 0,68      |
| $\text{Fe}_{80}\text{P}_{14}\text{B}_6$                          | <i>G</i>                          | 6,86                        | 0,04                                                  | 2,5 | 80  | 950  | 0,014                              | 1,1  | 28  | 200  | 25                 | 0,1                             | 0,37      |
| $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{30}\text{P}_{14}\text{B}_6$            | <i>H</i>                          | 7,65                        | 0,09                                                  | 5   | 380 | 1700 | 0,022                              | 1,2  | 50  | 1000 | 30                 | 0,050                           | 0,84      |
| $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$            | —                                 | 7,5—7,7                     | 0,06                                                  | 5,5 | 550 | 1300 | 0,014                              | 0,92 | 49  | 820  | 36                 | 0,035                           | 0,85      |
| $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$           | <i>M</i>                          | 8,0                         | —                                                     | —   | —   | —    | —                                  | —    | —   | —    | —                  | 0,010                           | 0,85      |
| $\text{Fe}_3\text{Co}_{72}\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$    | <i>O</i>                          | 7,3                         | 0,025                                                 | 1   | 28  | 190  | 0,006                              | 0,35 | 16  | 230  | 20                 | 0,015                           | 0,82      |

Материалы со специальными магнитными свойствами и магнитоотрицательными свойствами. Здесь приведены данные о сплавах (табл. 27.31) с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых полях ( $\mu_{r\text{нач}}$  неизменна с погрешностью 1—5% в интервале  $H$  от 0 до 300 А/м), типичные характеристики одного из термомангнитных материалов (рис. 27.91), а также сведения о магнитоотрицательных материалах (табл. 27.32). В первую из этих групп входят в основном железоникель-кобальтовые сплавы (см. также рис. 27.43 и табл. 27.12), подвергнутые отжигу (перминвар) или термомеханической обработке (изоперм), а во вторую — железоникель-хромовые (компенсатор) (рис. 27.91), железоникелевые (термаллой), никель-медные (кальмаллой) сплавы. Сведения об интерметаллидах редкоземельный элемент — железо (перспективных магнитоотрицательных материалах) содержатся в п. 27.3.2 (см. табл. 27.13, рис. 27.55, 27.58, 27.63, 27.66—27.68). Магнитные материалы со специальными свойствами детально описаны в справочнике [28].

Таблица 27.31. Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с низкой остаточной индукцией и повышенным постоянством магнитной проницаемости [8]

| Марка | Толщина, мм | $\mu_{r\text{нач}}$ | $\frac{\mu_{r\text{max}}}{\mu_{r\text{нач}}}$ | $\alpha_H$ при $H=800 \text{ А/м}$ | $\frac{d\mu_r}{dT}, 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ( $T = -60 \text{ } ^\circ\text{C} \div +120 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) |
|-------|-------------|---------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 47НК  | 0,01—0,1    | 900—1100            | 1,15                                          | 0,05                               | 0,06                                                                                                                              |
| 47НКХ | 0,02—0,1    | 1500                | 1,2                                           | 0,05                               | 0,03                                                                                                                              |

Продолжение табл. 27.31

| Марка | Толщина, мм | $\mu_{r\text{нач}}$ | $\frac{\mu_{r\text{max}}}{\mu_{r\text{нач}}}$ | $\alpha_H$ при $H=800 \text{ А/м}$ | $\frac{d\mu_r}{dT}, 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ( $T = -60 \text{ } ^\circ\text{C} \div +120 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) |
|-------|-------------|---------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 64Н   | 0,01—0,1    | 2000—2200           | 1,2                                           | 0,07                               | 0,06                                                                                                                              |
| 40НKM | 0,01—0,1    | 1800                | 1,2                                           | 0,07                               | —                                                                                                                                 |

Примечание. Здесь  $\alpha_H = B_r/B_{\text{max}}$  — коэффициент прямоуглоугольности петли гистерезиса,  $d\mu_r/dT$  — температурный коэффициент проницаемости.

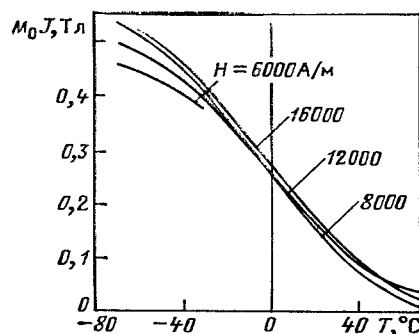


Рис. 27.91. Термомангнитные характеристики сплава марки 32НХ2Ю при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля [28]

Таблица 27.32. Основные характеристики металлических магнитоотрицательных материалов\* [5]  
(обозначения см. в § 27.1)

| Материал и его марка | Химический состав              | $\rho$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup> | $E$ , $10^{11}$ Н/м <sup>2</sup> | Скорость звука $c_{зв}$ , $10^3$ м/с | $\mu_r$ | Тангенс магнитных потерь $\tan \delta$ , $10^3$ | $H_{опт}$ , $10^3$ А/м | $a$ , $10^2$ Н/(м <sup>2</sup> · Тл) | $K$       | $\Delta$ , $10^{-9}$ Тл · м <sup>2</sup> /Н |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------|-------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------|---------------------------------------------|
| Никель НП2Т          | Ni более 98%                   | 8,9                               | 2,15                             | 4,9                                  | 35      | 60                                              | 1—2                    | 2,3                                  | 0,26—0,3  | 4,2                                         |
| Сплав NiCo           | 4% Co, остальное Ni            | 8,9                               | 2,15                             | 4,9                                  | —       | 55                                              | 2                      | 2,7                                  | 0,43—0,5  | —                                           |
| Сплав NiCo           | 2,3% Cr, 1,4% Co, остальное Ni | 8,8                               | 2,25                             | 5,0                                  | —       | —                                               | 2,5                    | 2,9                                  | 0,37      | —                                           |
| Сплав никоси         | 4% Co, 2% Si, остальное Ni     | 8,8                               | 1,9                              | 4,8                                  | 210     | —                                               | 0,4—0,6                | 1,8                                  | 0,49      | 28                                          |
| Сплав пермендюр 49КФ | 49% Co, 2% V, остальное Fe     | 8,2                               | 2,05                             | 5,2                                  | 200     | 400                                             | 0,4—0,6                | 2,2                                  | 0,48—0,54 | 27                                          |
| Сплав 65К            | 65% Co, остальное Fe           | 8,2                               | 2,05                             | 5,2                                  | 70      | 500                                             | 1—1,7                  | 1,5                                  | 0,27—0,30 | 7                                           |
| Сплав алфер 14Ю      | 14% Al, остальное Fe           | 6,6                               | 1,63                             | 5,0                                  | 110     | 60                                              | 0,3—0,6                | 1,15                                 | 0,26      | 15                                          |
| Сплав алфер 12Ю      | 12,4% Al, остальное Fe         | 6,7                               | 1,58                             | 4,8                                  | 30      | 30                                              | 0,3—0,6                | 0,85                                 | 0,30      | 20                                          |

Продолжение табл. 27.32

| Материал и его марка | Химический состав              | $Q$ | $\epsilon_{опт}$ , $10^{-2}$ Ом · м | $H_c$ , $10^2$ А/м | $B_s$ , $10^{-1}$ Тл | $\lambda_s$ , $10^{-6}$ | $T_c$ , °C | $\lambda_s E$ , $10^3$ Н/м <sup>2</sup> | Усталостная динамическая прочность $\sigma_{дин}$ , $10^3$ Н/м <sup>2</sup> | Предел прочности $\sigma_{пр}$ , $10^3$ Н/м <sup>2</sup> | Предел текучести $\sigma_t$ , $10^3$ Н/м <sup>2</sup> |
|----------------------|--------------------------------|-----|-------------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Никель НП2Т          | Ni более 98%                   | 750 | 0,7                                 | 1,7                | 6,1                  | —37                     | 360        | 40                                      | 1000                                                                        | 3600                                                     | 1000                                                  |
| Сплав NiCo           | 4% Co, остальное Ni            | —   | 1,0                                 | —                  | 7,0                  | —36                     | 410        | 41                                      | 1000                                                                        | —                                                        | —                                                     |
| Сплав NiCo           | 2,3% Cr, 1,4% Co, остальное Ni | —   | 3,0                                 | —                  | 4,8                  | —33                     | 260        | 37                                      | —                                                                           | —                                                        | —                                                     |
| Сплав никоси         | 4% Co, 2% Si, остальное Ni     | —   | 1,8                                 | 0,17—0,25          | 6,2                  | (—25) — (—27)           | 350        | 26—28                                   | —                                                                           | 4200                                                     | 850                                                   |
| Сплав пермендюр 49КФ | 49% Co, 2% V, остальное Fe     | 600 | 3,4                                 | 1,4                | 24,0                 | +70                     | 980        | 80                                      | 1100                                                                        | 5000                                                     | 3500                                                  |
| Сплав 65К            | 65% Co, остальное Fe           | 600 | 0,8                                 | 1,0                | 22,0                 | +90                     | 980        | 90                                      | —                                                                           | 6700                                                     | 4500                                                  |
| Сплав алфер 14Ю      | 14% Al, остальное Fe           | 300 | 12                                  | 0,25               | 12,0                 | +40                     | 500        | 34                                      | —                                                                           | 7500                                                     | 5500                                                  |
| Сплав алфер 12Ю      | 12,4% Al, остальное Fe         | 400 | 16                                  | 0,1                | 16,0                 | +40                     | 600        | 34                                      | 300                                                                         | 8000                                                     | 6000                                                  |

\* Ссылка на материалы на основе интерметаллических соединений редкоземельных металлов приведена перед табл. 27.31.

**27.4.2. Магнитотвердые материалы.** Для изготовления постоянных магнитов применяются материалы следующих основных групп: легированные углеродистые стали (табл. 27.33), характеризующиеся умеренными значениями коэрцитивной силы  $H_c$  и максимальной плотности магнитной энергии  $(BH)_{max}$ ; железоникель-алюминиевые дисперсионно-твердеющие сплавы (типа альнико, тикональ, альни, табл. 27.34), деформируемые железокобальт-хромовые (табл. 27.35) и железокобальт-ванадиевые (викаллой, рис. 27.92) сплавы, имеющие повышенные значения указанных характеристик; сплавы платина — кобальт (рис. 27.93) и сплавы на основе интерметаллида  $\text{SmCo}_5$  (табл. 27.36, рис. 27.94), обладающие большими значениями параметров. Есть сообщения о ма-

териале с примерным составом  $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$  [18,99], который имеет еще более высокие характеристики:  $T_c = 585$  К,  $B_r = 1,23$  Тл,  $H_{cb} = 880$  кА/м,  $H_{cl} = 960$  кА/м,  $(BH)_{max} = 290$  кДж/м<sup>3</sup>. Этот материал образует тетрагональную кристаллическую решетку с периодами  $a = 0,880$  нм и  $c = 1,221$  нм, его плотность 7,4 г/см<sup>3</sup>.

В марках магнитотвердых сплавов буквы и цифры указывают на массовое содержание, %, алюминия (Ю), ванадия (Ф), вольфрама (В), кобальта (К), меди (Д), молибдена (М), никеля (Н), титана (Т). Буква А обозначает наличие кристаллической текстуры, улучшающей свойства сплава. Подробные данные о большинстве из упомянутых в этом пункте материалов приведены в [28].

Таблица 27.33. Магнитные характеристики (нижние предельные значения) легированных углеродистых сталей при намагничивании в полях напряженностью  $H_{\max}$  [6]

| Марка    | $H_{\max}$ , кА/м | $H_c$ , А/м | $B_r$ , Тл |
|----------|-------------------|-------------|------------|
| EX3      | 39,8              | 4775        | 0,95       |
| ЭВ6      | 39,8              | 4775        | 1,00       |
| EX5K5    | 79,6              | 7162        | 0,85       |
| EX9K15M2 | 79,6              | 11 937      | 0,80       |

Таблица 27.34. Магнитные характеристики (нижние предельные значения) литых магнитотвердых материалов на основе дисперсионно твердеющих железоникель-алюминиевых сплавов [7]

| Марка      | $(BH)_{\max}$ , кДж/м³ | $H_{cB}$ , кА/м | $B_r$ , Тл | $B/H$ в точке $(BH)_{\max}$ , 10⁻³ Тл·м/кА |
|------------|------------------------|-----------------|------------|--------------------------------------------|
| ЮНД4       | 7,2                    | 40              | 0,50       | 12,0—16,0                                  |
| ЮНД8       | 10,2                   | 44              | 0,60       | 13,0—16,0                                  |
| ЮНТС       | 8,0                    | 58              | 0,43       | 7,0—10,0                                   |
| ЮНДК15     | 12,0                   | 48              | 0,75       | 15,5—18,0                                  |
| ЮНДК18     | 19,4                   | 55              | 0,90       | 15,0—20,0                                  |
| ЮНДК18С    | 28                     | 44              | 1,10       | 22,0—28,0                                  |
| ЮН13ДК24С  | 36                     | 36              | 1,30       | 30,0—33,0                                  |
| ЮН13ДК24   | 36                     | 40              | 1,25       | 25,0—27,5                                  |
| ЮН14ДК24   | 35                     | 48              | 1,20       | 20,0—22,0                                  |
| ЮН15ДК24   | 36                     | 52              | 1,15       | 15,0—17,5                                  |
| ЮН14ДК24Т2 | 30                     | 60              | 1,10       | 16,0—19,0                                  |
| ЮН13ДК25А  | 56                     | 44              | 1,40       | 27,5—30,0                                  |
| ЮН14ДК25А  | 56                     | 52              | 1,35       | 24,0—25,0                                  |
| ЮН13ДК25БА | 56                     | 48              | 1,40       | 26,5—27,5                                  |
| ЮН14ДК25БА | 56                     | 58              | 1,30       | 21,5—24,0                                  |
| ЮН15ДК25БА | 56                     | 62              | 1,25       | 16,5—21,5                                  |
| ЮНДК31Т3БА | 64                     | 92              | 1,15       | 11,0—14,0                                  |
| ЮНДК34Т5   | 28                     | 92              | 0,75       | 8,0—11,0                                   |
| ЮНДК35Т5Б  | 32                     | 96              | 0,75       | 8,0—10,0                                   |
| ЮНДК35Т5   | 36                     | 110             | 0,75       | 7,0—8,0                                    |
| ЮНДК35Т5БА | 72                     | 110             | 1,02       | 8,0—9,0                                    |
| ЮНДК35Т5АА | 80                     | 115             | 1,05       | 8,0—9,0                                    |
| ЮНДК38Т7   | 36                     | 135             | 0,75       | 4,5—5,5                                    |
| ЮНДК40Т8   | 36                     | 145             | 0,70       | 3,5—4,5                                    |
| ЮНДК40Т8АА | 64                     | 145             | 0,90       | 4,0—5,0                                    |

Таблица 27.35. Магнитные характеристики (нижние предельные значения) магнитотвердых материалов на основе деформируемых железокобальт-хромовых сплавов [13]

| Марка*    | $(BH)_{\max}$ , кДж/м³ | $H_{cB}$ , кА/м³ | $B_r$ , Тл |
|-----------|------------------------|------------------|------------|
| 28Х10К    | 7                      | 20               | 0,8        |
| 38Х10КА   | 26                     | 38               | 1,1        |
| 25Х15К    | 10                     | 24               | 0,9        |
| 25Х15КА   | 32                     | 40               | 1,2        |
| 23Х15К5ФА | 36                     | 42               | 1,25       |
| 20Х23К    | 12                     | 50               | 0,75       |
| 30Х23КА   | 30                     | 55               | 1,00       |

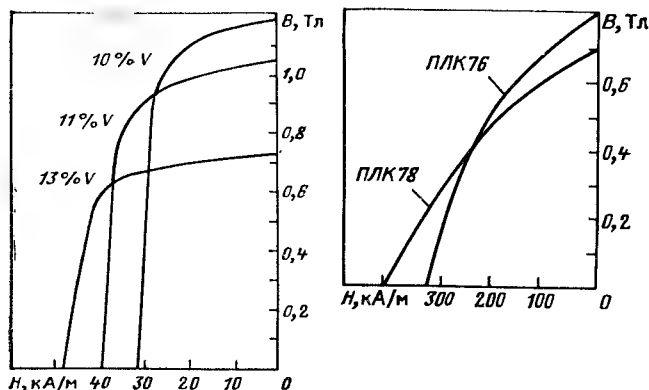


Рис. 27.92. Кривые размагничивания железокобальт-ванадиевого сплава викаллой 52КФ для различного содержания ванадия [27]

Рис. 27.93. Кривые размагничивания платинокобальтовых сплавов [27]

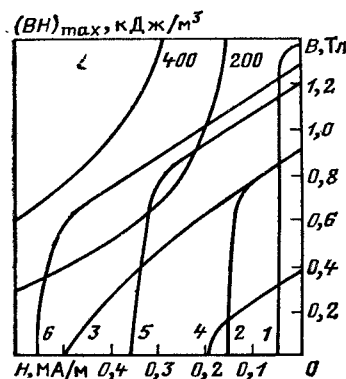


Рис. 27.94. Кривые размагничивания и кривые равных значений максимальной плотности магнитной энергии  $(BH)_{\max}$  для различных магнитотвердых материалов: 1 — ЮН13ДК25БА; 2 — ЮНДК40Т8АА; 3 — КСП37А; 4 — бариевый феррит; 5 и 6 —  $\text{Sm}_{0,05}\text{Zr}_{0,05}(\text{Co}_{0,7}\text{Fe}_{0,2}\text{Si}_{0,1})_7$  спеченный и литой соответственно [25]

Таблица 27.36. Основные магнитные характеристики (нижние предельные значения) материалов на основе интерметаллида  $\text{SmCo}_5$  [12]

| Марка  | $B_r$ , Тл | $H_{cB}$ , кА/м | $\frac{(BH)_{\max}}{2}$ , кДж/м³ | $H_{cJ}$ , кА/м |
|--------|------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| КС37   | 0,77       | 540             | 55                               | 1300            |
| КС37А  | 0,82       | 560             | 65                               | 1000            |
| КСП37  | 0,85       | 520             | 65                               | 800             |
| КСП37А | 0,90       | 500             | 73                               | 640             |

\* К — кобальт, С — самарий, П — празеодим, А — кристаллическая текстура, улучшающая свойства сплава.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов К. П., Левитин Р. З., Никитин С. А., Педько А. В. // Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. № 6. С. 1562—1569.
2. Бердышев А. А. Введение в квантовую теорию ферромагнетизма: Курс лекций. Ч. 4. Свердловск: Изд-во Уральского гос. ун-та, 1971.
3. Бозорт Р. Ферромагнетизм: Пер. с англ./Под ред. Е. И. Кондорского, Б. Г. Лившица. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
4. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
5. Голямина И. П. Магнитострикционные материалы/Ультразвук. Маленькая энциклопедия/Под ред. И. П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. С. 194—195.
6. ГОСТ 6862-71. Прутки из легированной магнитотвердой стали. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1971.
7. ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые. Марки и технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1972.
8. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1975.
9. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. М.: Изд-во стандартов, 1975.
10. ГОСТ 21427.3-75. Сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая. М.: Изд-во стандартов, 1975.
11. ГОСТ 21427.4-78. Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1978.
12. ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1976.
13. ГОСТ 24897-81. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки, технические требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1981.
14. ГОСТ 3836-83. Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.
15. ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.
16. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.
17. Дерягин А. В., Кудреватых Н. В., Башков Ю. Ф./Труды Международной конференции по магнетизму МКМ-73. М.: Наука, 1974. Т. 1. Ч. 2. С. 222—225.
18. Дерягин А. В., Тарасов Е. Н., Андреев А. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 11. С. 516—519.
19. Ермоленко А. С., Королев А. В. // Физика металлов и металловедение. 1973. Т. 36. № 1. С. 52—59.
20. Ермоленко А. С. // Труды Международной конференции по магнетизму МКМ-73. М.: Наука, 1974. Т. 1. Ч. 1. С. 231—236.
21. Ермоленко А. С. Магнитные свойства монокристаллов редкоземельных соединений со структурой типа  $\text{CaF}_2$  // Физические свойства магнитных материалов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. С. 32—38.
22. Ермоленко А. С. Магнетизм высокоанизотропных редкоземельных соединений типа  $\text{RCO}_5$ : Дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук. Свердловск: Ин-т физики металлов АН СССР, 1983.
23. Кондорский Е. И., Седов В. Л. // Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 38. № 3. С. 773—779.
24. Кудреватых Н. В. Магнитные свойства и магнитная анизотропия некоторых интерметаллических соединений редкоземельных металлов с металлами группы железа типа  $\text{R}_2\text{T}_{17}$ : Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук. Свердловск: Уральский гос. ун-т, 1977.

25. Мишин Д. Д. Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1981.
26. Рыков Г. А. Металлы, сплавы и металлургические изделия // Электротехнические материалы: Справочник. М., Энергоатомиздат, 1983. С. 286—447.
27. Сергеев В. Г. Магнитные материалы // Электротехнический справочник/Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергия, 1980. Т. 1. С. 439—463.
28. Прецизионные сплавы: Справочник/Под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983.
29. Abbundi R., Clark A. E. // J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. № 3. (pt. 2). P. 1969—1971.
30. American Institute of Physics Handbook/Ed. by D. E. Gray. N. Y.: McGraw Hill, 1963.
31. Arais S., Colvin R. V. // J. Phys. Chem. Solids. 1963. Vol. 24, № 10. P. 1233—1237.
32. Aubert G. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 2 (pt 1). P. 504—510.
33. Barnier Y., Pauthenet R., Rimet G. // Compt. rend. Acad. sci. 1961. Vol. 252, № 19. P. 2839—2841.
34. Elliott J. F., Legvold S., Spedding F. // Phys. Rev. 1958. Vol. 94, № 5. P. 1143—1145.
35. De Boer F. R., Biesterbos J., Schinkel C. J. // Phys. Lett. 1967. Vol. 24A, № 7. P. 355—357.
36. Bower D. I. // Proc. Roy. Soc. 1971. Vol. A326, № 1564. P. 87—96.
37. Bozorth R. M. // J. Appl. Phys. 1937. Vol. 8, № 9. P. 575—588.
38. Bozorth R. M. // Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25, № 1. P. 42—48.
39. Bozorth R. M. // Phys. Rev. 1954. Vol. 96, № 2. P. 311—316.
40. Bozorth R. M., Clark A. E., Van Vleck J. H. // Intern. J. Magnetism. 1972. Vol. 2, № 1. P. 19—22.
41. Bozorth R. M., McGuire T. R., Hudson R. P. // American Institute of Physics Handbook/Ed. by D. E. Grey. N. Y.: McGraw Hill, 1972. P. 5-139—5-311.
42. Burzo E. // Z. Angew. Phys. 1971. Bd. 32. S. 127—130.
43. Buschow K. H. J. // Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp. 1980. Vol. 1. P. 297—414.
44. Cable J. W., Wollan E. O. // Phys. Rev. Vol. 165, № 2. P. 733—734.
45. Carr W. J. // Handbook der Physik/Ed. by S. Flugge. Berlin: Springer-Verlag, 1966. Bd. 18/2. S. 100—200.
46. Chin G. Y., Wernick J. H. // Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland. Publ. Comp., 1980. Vol. 2. P. 55—188.
47. Clark A. E., Cullen J., Sato K. // AIP Conf. Proc. 1975, № 24. N. Y.: Amer. Inst. Phys., P. 192—195.
48. Clark A. E., Abbundi R., Savage H. T., Masters O. D. // Physica. 1977. Vol. 86-88B, pt 1, P. 73—74.
49. Clark A. E., Abbundi R., Gillinor W. G. // IEEE Trans. Mag. 1978. Vol. MAG-14. P. 542—545.
50. Clark A. E. // Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 531—589.
51. Cohen R. L., Sherwood R. C., Wernick J. H. // Phys. Lett. 1968. Vol. 26A, № 10. P. 462—463.
52. Corner W. D., Tanner B. K. // J. Phys. 1976. Vol. C9, № 4. P. 627—633.
53. Creveling L., Luo H. L., Knapp G. S. // Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 18, № 20. P. 851—852.
54. Cullity B. D. Introduction to Magnetic Materials. Reding: Addison-Wesley, 1972.
55. Danan H., Herr A., Meyer A. J. P. // J. Appl. Phys. 1968 Vol. 39, № 2, pt 1. P. 669—670.
56. Eschenfelder A. H. // Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam. North-Holland Publ. Com., 1980. Vol. 2. P. 345—380.
57. Escudier P. Ph. D. Thesis. Grenoble Univ. 1973.

- (см. В [110]); Franse J. J. M., de Vries G.//Physica. 1968. Vol. 39, № 4. P. 477—498.
58. Feron J. L., Hug G., Pauthenet R.//Z. Angew. Phys. 1970. Bd. 30, № 1. S. 61—64; Les Elements des Terres Rares. Paris: CNRS, 1970. Vol. 2. P. 19—29.
59. Ferromagnetic materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland, Publ. Comp., 1980. Vol. 1, 2.
60. Gardner W. E., Smith T. F., Howlett B. W. e. a.//Phys. Rev. 1968. Vol. 166, № 2. P. 577—588.
61. Gersdorf R. Ph. D. Thesis Amsterdam Univ., 1961 (см. В [110]).
62. Graham C. D., Jr.//Phys. Rev. 1958. Vol. 112. № 4. P. 1117—1120.
63. Green R. W., Legvold S., Spedding F. H.//Ibid 1961. Vol. 122, № 3. P. 827—830.
64. Hall R. C.//J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30, № 6. P. 816—819.
65. Hall R. C.//Trans. Metallurg. Soc. AIME. 1960. Vol. 218. P. 268—271.
66. Hegland D. E., Legvold S., Spedding F. H.//Phys. Rev. 1963. Vol. 131, № 1. P. 158—162.
67. Honda K., Kaya S.//Sci. Repts Tohoku Univ. 1926. Vol. 15. P. 721—724.
68. Honda K., Masumoto H., Kaya S.//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 111—114.
69. Honda K., Masumoto H.//Ibid. 1931. Vol. 20. P. 322—325.
70. Hubert A., Unger W., Kranz J.//Z. Phys. 1969. Bd. 224, № 1—3. S. 148—155.
71. Huray P. G., Nave S. E., Peterson J. R., Haire R. G.//Physica 1980. Vol. 102B, № 1—3. P. 217—220.
72. Kase T.//Sci. Repts Tohoku Univ. 1927. Vol. 16. P. 491—494.
73. Kaya S.//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 639—642.
74. Kaya S.//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 1157—1160.
75. Klein H. P., Menth A., Perkins R. S.//Physica. 1975. Vol. 80B, № 1—4. P. 153—163.
76. Laforest J., Lemaire R., Pauthene R., Schweizer J.//Compt. rend. Acad. sci. 1966. Vol. B262, № 19. P. 1260—1263.
77. Landolt-Börnstein. Zahlenwerte and Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. Berlin: Springer-Verlag, 1962. Bd. 2. Teil 9.
78. Lee E. W., Asgar M. A.//Proc. Roy. Soc. 1971. Vol. A326, № 1564. P. 73—85.
79. Legvold S., Alstad J., Rhyne J.//Phys. Rev. Lett. 1963. Vol. 10, № 12. P. 509—511.
80. Legvold S. Rare Earth Metals and Alloys//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 183—295.
81. Littman M. F.//IEEE Trans. Mag. 1971. Vol. MAG-7. P. 48—51.
82. Luborsky P. E.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 451—530. (См. также Хандрих К., Кобе С. Аморфные ферро- и ферримангнетики: Пер. с нем. М.: Мир, 1982.)
83. Mattias B. T., Bozorth R. M.//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 604—605.
84. Mattias B. T., Clogston A. M., Williams H. J. e. a.//Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 7, № 1. P. 7—9.
85. Matlocks P. G., Melville D.//J. Phys. F: Metal Phys. 1978. Vol. 8, № 6. P. 1291—1302.
86. McEwen K. A.//Handbook of the Physics and Chemistry of Rare Earth/Eds. K. A. Gschneider, L. Eyring. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1978. Ch. 6.
87. Mihai V., Franse J. J. M.//Rev. Roum. Phys. 1976. Vol. 21. P. 1041—1044.
88. Mishima A., Fujii H., Okamoto T.//J. Phys. Soc. Jap. 1976. Vol. 40, № 4. P. 962—967.
89. Mydosh J. A., Nieuwenhuys G. J.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 71—182.
90. Myers H. P., Sucksmith W.//Proc. Roy. Soc. 1951. Vol. A207, № 1091. P. 427—446.
91. Nakagawa Y.//J. Phys. Soc. Jap. 1956. Vol. 11, № 8. P. 855—863.
92. Nigh H. E., Legvold S., Spedding F. H.//Phys. Rev. 1963. Vol. 132, № 3. P. 1092—1097.
93. Ogawa S., Sakamoto N.//J. Phys. Soc. Jap. 1967. Vol. 22, № 5. P. 1214—1221.
94. Pauthenet R.//High Field Magnetism/Ed. by M. Date. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1983. P. 77—86.
95. Rhyne J. J. Ph. D. thesis. Iowa State Univ. Ames, Iowa. 1965 (см. В [80]).
96. Rhyne J. J., Legvold S.//Phys. Rev. 1965. Vol. 138A, № 1. P. 507—514.
97. Rhyne J. J., Foner S., McNiff E. J., Jr., Doclo R.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, № 2. pt. 2. P. 892—893.
98. Richards D. B., Legvold S.//Phys. Rev. 1969. Vol. 186, № 2. P. 508—514.
99. Sagawa M., Fujimura S., Togawa N. e. a.//J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55, № 6, pt. 2A. P. 2083—2087.
100. Sato H., Chandrasekhar B. S.//J. Phys. Chem. Solids. 1957. Vol. 1, № 4. P. 228—233.
101. Shimizu M.//Rep. Prog. Phys. 1981. Vol. 44. P. 329—409.
102. Stoelinga J. H. M., Gersdorf R., de Vries G.//Physica. 1965. Vol. 31, № 3. P. 349—361.
103. Strandburg D. L., Legvold S., Spedding F. H.//Phys. Rev. 1962. Vol. 127, № 6. P. 2046—2051.
104. Sucksmith W., Thompson J. E.//Proc. Roy. Soc. 1954. Vol. A225, № 1162. P. 362—375.
105. Tange H., Tokunaga T.//J. Phys. Soc. Jap. 1969. Vol. 27, № 3. P. 554—560.
106. Tebble R. S., Craik D. J. Magnetic Materials. Lond.: Wiley Intersci., 1969.
107. Trzebiatowski W.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 415—450.
108. Weiss P., Forrer R.//Ann. Phys. 1929. Vol. 12. P. 279—281.
109. Williams G. M., Pavlovic A. S.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, № 2, pt. 1. P. 571—572.
110. Wohlfarth E. P.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 1—70.
111. Yamamoto M., Nakamichi T.//J. Phys. Soc. Jap. 1958. Vol. 13, № 2. P. 228—229.

# Глава 28

## АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

В. И. Ожогин, В. Г. Шапиро

### 28.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Обменное взаимодействие, обуславливающее упорядоченную магнитную структуру вещества, может приводить как к параллельной, так и к антипараллельной (а то и к более сложной) взаимной ориентации магнитных моментов соседних атомов в кристаллах. Вещества, в которых происходит полная (или почти полная) компенсация моментов отдельных ионов, называются **антиферромагнетиками**. Сведения о магнитной структуре и свойствах антиферромагнетиков можно найти в монографиях [1—16] и справочнике [17]. Экспериментальные данные по магнитным свойствам антиферромагнетиков, как правило, хорошо объясняются, если представить их магнитную структуру как суперпозицию двух (или более) вставленных одна в другую подрешеток, в каждой из которых магнитные моменты атомов параллельны друг другу. В настоящее время известно большое число различных неколлинеарных магнитных структур, в частности геликоидальные (например,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MnAu}_2$ ), синусоидально-модулированные (типа  $\text{CeAl}_2$ ) и другие, у которых компенсация магнитного момента может иметь место по довольно обширному, почти макроскопическому объему кристалла. Эти соединения обычно также относят к антиферромагнетикам. Более подробно о различных неколлинеарных магнитных структурах написано в монографии [12] и обзоре [18].

### 28.2. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКООСНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ $\text{MnF}_2$ )

Простейшим двухподрешеточным антиферромагнетиком, свойства которого в настоящее время изучены наиболее детально, является  $\text{MnF}_2$  (рис. 28.1). Магнит-

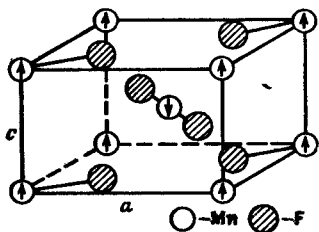


Рис. 28.1. Магнитная структура  $\text{MnF}_2$  при  $T < T_N$  [16]

ная восприимчивость выше температуры магнитного упорядочивания — точки Нееля ( $T_N$ ) подчиняется закону Кюри — Вейса:  $\chi = C/(T - \theta)$  ( $\theta$  в антиферромагнетиках обычно отрицательна), ниже точки Нееля поведение магнитной восприимчивости зависит от направления внешнего магнитного поля относительно осей кристалла. Одноосные кристаллы, т. е. кристаллы, имеющие одно выделенное направление (ось), обычно характеризуются магнитной восприимчивостью  $\chi_{\parallel}$  в поле, параллельном оси, и  $\chi_{\perp}$  в поле, перпендикулярном оси. Если эта ось «легкая», т. е. именно вдоль нее в положении равновесия ориентированы магнитные моменты подрешеток (как в  $\text{MnF}_2$ ), то при  $T = T_N$  магнитная восприимчивость  $\chi_{\parallel}$  имеет максимум (рис. 28.2). Около точки Нееля имеется

также четкий максимум на кривой зависимости удельной теплоемкости от температуры (рис. 28.3). Безусловным критерием существования антиферромагнитного упорядочения могут служить лишь результаты экспериментов по дифракции нейтронов, однако наличие аномалий в температурных зависимостях магнитной восприимчивости и теплоемкости позволяет предполагать (с дос-

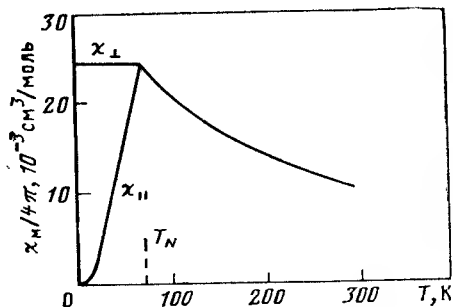


Рис. 28.2. Зависимость восприимчивостей  $\chi_{\parallel}$  и  $\chi_{\perp}$  монокристалла  $\text{MnF}_2$  от температуры [19]

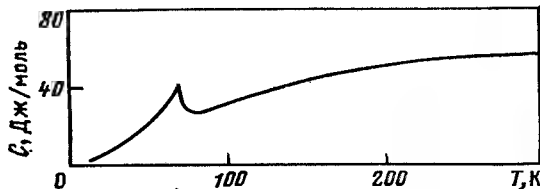


Рис. 28.3. Зависимость удельной теплоемкости  $\text{MnF}_2$  от температуры [20]

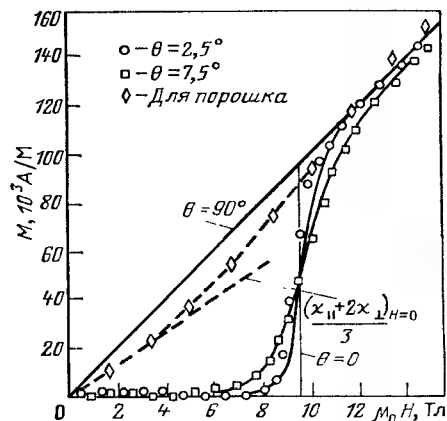


Рис. 28.4. Зависимость намагниченности  $M$  монокристалла  $\text{MnF}_2$  при  $T = 4,2$  К от напряженности магнитного поля, ориентированного вдоль легкой оси ( $\theta = 0$ ) и отклоненного от нее на небольшие углы: сплошные линии — расчет в приближении теории молекулярного поля [21]

точно большой вероятностью) существование в кристалле антиферромагнитного упорядочения

На кривой намагничивания в поле, параллельном легкой оси (рис. 28.4), при  $\mu_0 H_c = 9,3$  Тл наблюдается резкий скачок, соответствующий фазовому переходу

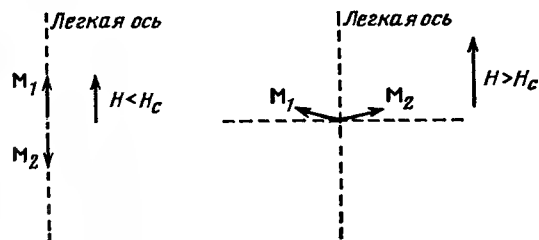


Рис. 28.5. Опрокидывание подрешеток в одноосном антиферромагнетике в магнитном поле, параллельном легкой оси

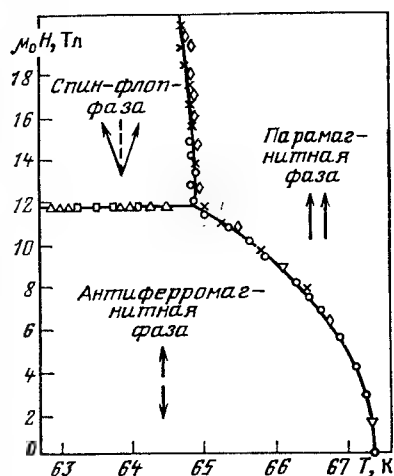


Рис. 28.6. Магнитная фазовая диаграмма  $\text{MnF}_2$  в магнитном поле, параллельном легкой оси [001] [22]:

экспериментальные точки получены с помощью измерения поглощения ультразвука (для нескольких образцов)

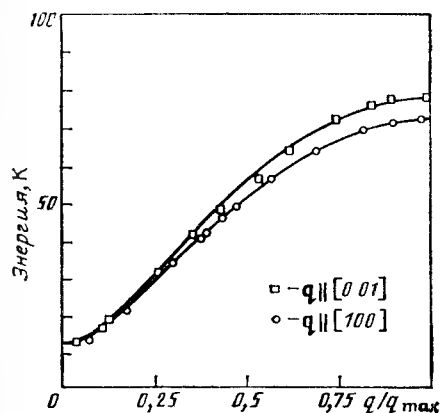


Рис. 28.7. Спектр магнонов в  $\text{MnF}_2$  при  $T = 4,2$  К [23]: дисперсионные кривые определены из неупругого рассеяния нейтронов для двух направлений волнового вектора  $q$

первого рода между двумя состояниями магнитной структуры. В этом поле происходит опрокидывание магнитных подрешеток — спин-флор (spin-flor) (рис. 28.5). Фазовая диаграмма простого легкоосного антиферромагнетика в  $TN$ -плоскости (рис. 28.6) состоит из трех фаз: парамагнитной, антиферромагнитной и фазы с опрокинутыми подрешетками (спин-флор-фаза).

Спектр магнонов (спиновых волн) имеет щель (рис. 28.7), которая определяет частоту  $\omega_0$  антиферромагнитного резонанса (АФМР). В приближении теории молекулярного поля  $\omega_0 = \gamma \sqrt{H_A \cdot 2H_E - H}$ , где  $H_E$  и  $H_A$  — эффективные поля обмена и анизотропии,  $H$  — напряженность внешнего магнитного поля, параллельного легкой оси. Температурная зависимость частоты АФМР обусловлена температурной зависимостью полей  $H_A$  и  $H_E$  (рис. 28.8).

В оптических и инфракрасных спектрах антиферромагнетиков имеются особенности, обусловленные магнитным упорядочением и участием магнонов в поглощении (или рассеянии) электромагнитных волн. (Вопросы спектроскопии антиферромагнетиков освещены в [4, 7, 25].) Электродипольное поглощение в длинноволновой инфракрасной области, связанное с одновременным рождением двух магнонов (двухмагнонное поглощение), иллюстрирует рис. 28.9. Особенностью оптических спектров поглощения антиферромагнитных диэлектриков является наличие дополнительных полос поглощения,

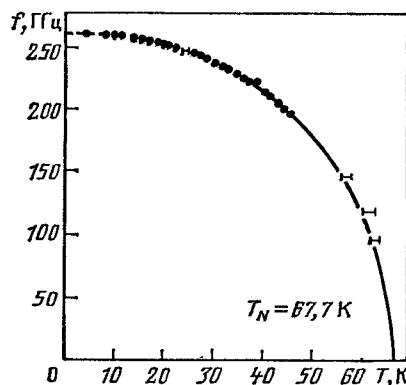


Рис. 28.8. Зависимость частоты АФМР в  $\text{MnF}_2$  от температуры [24]:

результаты получены на высоких частотах в малых магнитных полях. Горизонтальные черточки указывают погрешность при  $H = 0$ . Сплошная кривая — нормированная функция Брюллюэна для  $S = 5/2$

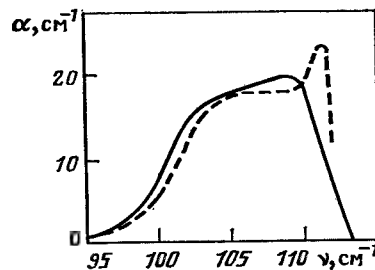


Рис. 28.9. Зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  от частоты, характеризующая форму двухмагнонного поглощения, в  $\text{MnF}_2$  при  $T = 4,2$  К [26]:

электрический вектор электромагнитной волны параллелен легкой осн. Сплошная кривая — эксперимент, пунктирная — расчет



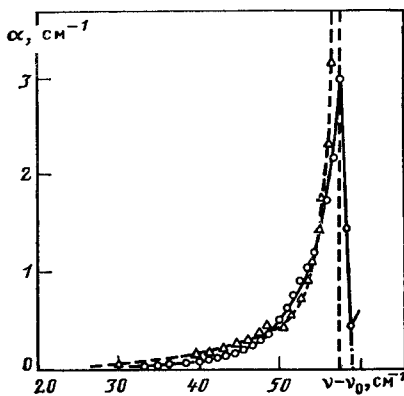


Рис. 28.10. Частотная зависимость коэффициента поглощения света в  $\text{MnF}_2$  в области экситон-магнонной полосы поглощения при  $T=2,2$  К [27]:

$\nu_0=18419,6$   $\text{см}^{-1}$  — частота магнитодипольной линии, соответствующей экситонному возбуждению; максимум спин-волнового спутника электродипольного происхождения приходится на  $\nu=18477$   $\text{см}^{-1}$ . Сплошная кривая — расчет, пунктирная — эксперимент

обусловленных экситон-магнонным переходом (рис. 28.10). Такие полосы в оптических спектрах антиферромагнетиков называют магнонными спутниками; они отделены от чисто электронных переходов интервалом  $\Delta\omega \approx kT_N$ . Результаты изучения эффекта Фарадея в красной и фиолетовой областях спектра приведены в обзоре [28], посвященном оптическим и магнитооптическим исследованиям магнитоупорядоченных диэлектриков. Спектры люминесценции антиферромагнитных кристаллов, в том числе  $\text{MnF}_2$ , обладают рядом низкотемпературных особенностей, происхождение которых не имеет однозначного толкования [7].

### 28.3. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ $\text{MnCO}_3$ , $\text{CoCO}_3$ )

Большой интерес с точки зрения как физических свойств, так и возможного технического применения представляют одноосные антиферромагнетики с анизотропией типа «легкая плоскость» (АФЛП). Выделенное направление в этих кристаллах является «трудной» осью для магнитных моментов подрешеток. Магнитная анизотропия в перпендикулярном этому направлению плоскости (ее называют базисной) обычно много меньше осевой анизотропии, и ею часто пренебрегают. Кривые намагничивания и спектр АФМР в кристаллах, обладающих анизотропией такого типа, существенно отличаются от соответствующих характеристик легкоосных антиферромагнетиков (рис. 28.11 и 28.12).

Ветви АФМР в АФЛП различаются симметрией участвующих в колебаниях компонент намагниченностей подрешеток [30]. Так называемая квазиферромагнитная ветвь (рис. 28.12) имеет щель  $\omega_{\text{АФМР}}(H=0)$ , определяемую средним геометрическим большого обменного поля и малого поля эффективной анизотропии в базисной плоскости. В эту щель могут давать заметный вклад магнитоупругое [32] и (при низких температурах) сверхтонкое [33] взаимодействия. Обменное поле усиливает влияние и магнитоупругого взаимодействия на спектр фононов, приводя к сильной зависимости скорости звука в АФЛП от магнитного поля (точнее, от его компоненты, параллельной легкой плоскости) [34].

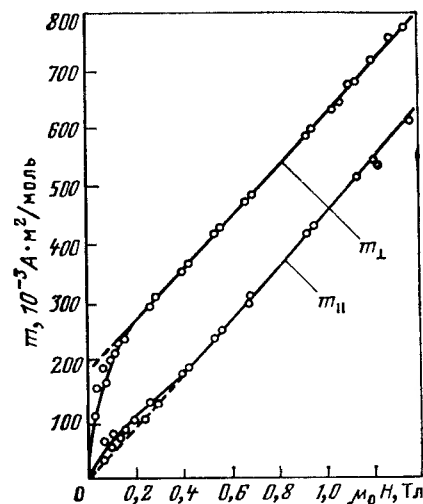


Рис. 28.11. Зависимость молярного магнитного момента от магнитного поля в  $\text{MnCO}_3$  при  $T=4,2$  К [29]:

$m_{||}$  — поле направлено вдоль трудной оси;  $m_{\perp}$  — поле приложено в базисной плоскости. Спонтанный момент обусловлен взаимодействием Дзялошинского, а не типом анизотропии

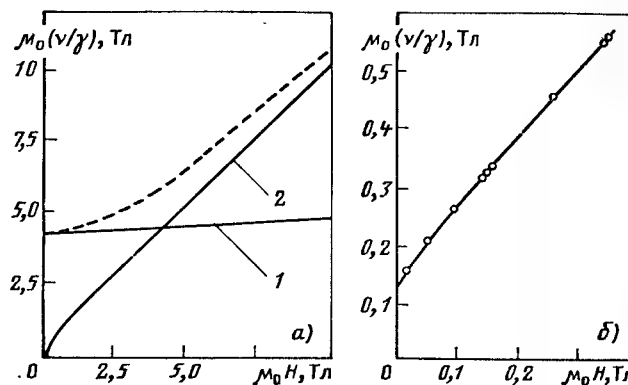


Рис. 28.12. Спектр АФМР в  $\text{MnCO}_3$  при  $T=4,2$  К [31]:

а — сплошные кривые — поле приложено в базисной плоскости, пунктир — перпендикулярно; 1 — квазиантиферромагнитная ветвь колебаний; 2 — квазиферромагнитная ветвь (возбуждается переменным магнитным полем, перпендикулярным постоянному); б — экспериментальные результаты [33] для малых значений напряженности поля

Дисперсия спиновых волн в АФЛП обладает определенной анизотропией. Например, в  $\text{CoCO}_3$  большую энергию при заданном  $|k|$  имеют спиновые волны, которые распространяются в направлении, перпендикулярном магнитному полю и легкой оси. Данные, приведенные на рис. 28.13 для  $\text{CoCO}_3$ , получены методом одномононного мандельштам-бриллюэновского рассеяния света с использованием в качестве анализатора интерферометра Фабри — Перо.

Особенности спектра и взаимодействий магнонов в АФЛП облегчают реализацию параметрического возбуждения спиновых волн в этих кристаллах [36]. В  $\text{MnCO}_3$  при параллельной ориентации высокочастотного и статического магнитных полей параметрическое возбуждение магнонов квазиферромагнитной ветви происходит с участием вынужденных колебаний квазианти-

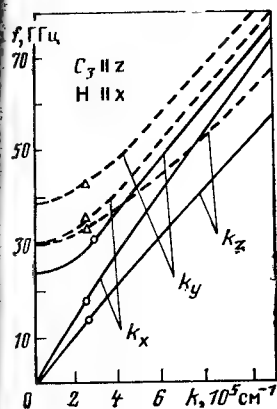


Рис. 28.13. Зависимость частоты магнонов от волнового вектора при  $H=0$  (сплошные кривые) и  $\mu_0 H=0,1$  Тл (пунктир) для  $\text{CoCO}_3$  [35, с. 245]

ферромагнитной ветви и может иметь скачкообразный («жесткий») характер [37].

При измерении теплопроводности  $\kappa$  в  $\text{MnCO}_3$  и  $\text{CoCO}_3$  были обнаружены особенности на кривых зависимости  $\kappa(T)$  в точке Нееля (рис. 28.14) [38]. Кроме  $\text{MnCO}_3$  и  $\text{CoCO}_3$  достаточно подробно изучены свойства и других АФЛП:  $\text{NiCO}_3$ ,  $\text{FeF}_3$ ,  $\text{FeBO}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ( $T_M < T_N$ )<sup>\*1</sup>,  $\text{CsMnF}_3$  и др. (см. табл. 28.1).

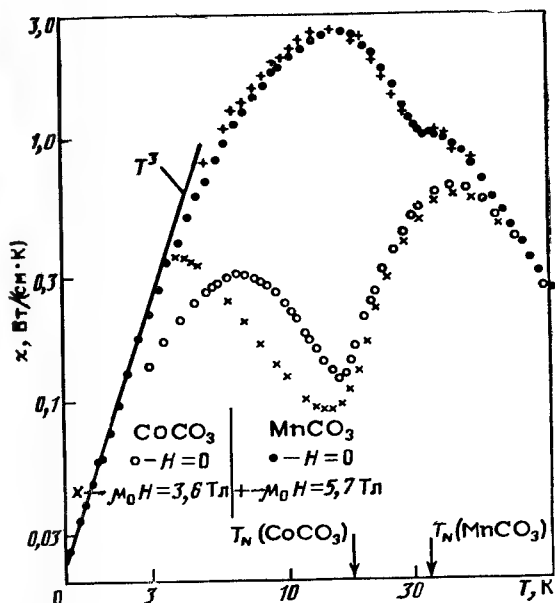


Рис. 28.14. Зависимость теплопроводности от температуры для  $\text{CoCO}_3$  и  $\text{MnCO}_3$

#### 28.4. МЕТАМАГНЕТИКИ

Метамagnetиками называют вещества, которые в отсутствие поля не имеют спонтанного момента, но приобретают его, начиная с некоторого критического поля. К ним относятся антиферромагнетики, у которых эффективное поле обменного взаимодействия:  $2H_A > H_E$ .

\*  $T_M$  — точка Морина — температура, при охлаждении ниже которой  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  переходит из легкоплоскостного состояния в легкоосное.

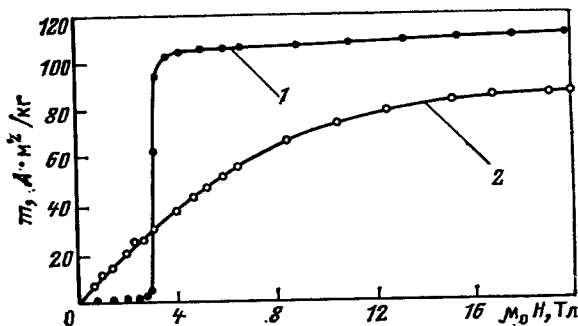


Рис. 28.15. Кривые намагничивания  $\text{FeBr}_2$  [39]: 1 — метамagnetическое состояние,  $T=4,2$  К; 2 — парамагнитное состояние,  $T=20,4$  К

Типичные зависимости  $M(H)$  метамagnetиков приведены на рис. 28.15. При  $T < T_N$  и поле  $H=H_0$  ( $T$ ) вещество переходит из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, минуя спин-фlop-фазу. Ниже приведены температуры упорядочивания и значения полей перехода (при  $T \leq T_N$ ) некоторых типичных метамagnetиков [15]:

| Метамagnetик                  | $T_N$ , К | $\mu_0 H_0$ , Тл |
|-------------------------------|-----------|------------------|
| $\text{FeCl}_2$               | 23,5      | 1,05             |
| $\text{FeBr}_2$ <sup>*1</sup> | 11        | 3,1              |
| $\text{FeCO}_3$               | 38        | 15,3 [40]        |

Более подробные сведения о свойствах метамagnetиков можно найти в монографиях [1, 15].

#### 28.5. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ СО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО

Существует ряд антиферромагнитных кристаллов, при описании магнитных свойств которых кроме изотропного обменного взаимодействия, определяющего собственно магнитное упорядочение, необходимо учитывать специфическое анизотропное взаимодействие Дзялошинского (ВД)<sup>\*2</sup>. ВД, как правило, приводит к небольшому наклону магнитных подрешеток друг относительно друга и появлению слабого ферромагнитного момента.

В [10] рассмотрены условия, при которых магнитная симметрия кристалла допускает существование слабого ферромагнетизма. В тех случаях, когда тип анизотропии или другие обстоятельства (например,  $T > T_N$ ) не допускают возникновения слабоферромагнитного момента, наложение внешнего магнитного поля может привести к возникновению определенных компонент антиферромагнитного вектора — так называемый индуцированный полем антиферромагнетизм [42].

Антиферромагнетики, обладающие слабым спонтанным моментом [ $\text{MnCO}_3$ ,  $\text{CoCO}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ( $T > T_M$ ),  $\text{CuF}_2$ ,  $\text{NiF}_2$ ,  $\text{RFeO}_3$  ( $R$  — редкоземельный ион),  $\text{NaNiF}_3$ ,  $\text{YCrO}_3$

<sup>\*1</sup>  $\text{FeBr}_2$  обладает антиферромагнитной слоистой структурой, характерной для многих метамagnetиков (два соседних слоя металлических ионов имеют антипараллельное направление магнитных моментов).

<sup>\*2</sup> Этот термин появился в литературе по магнетизму после феноменологического объяснения Дзялошинским [41] природы слабого ферромагнетизма в некоторых антиферромагнитных кристаллах. Влияние ВД на основные свойства антиферромагнетиков исследовано в [10].

и др.], часто называют слабыми ферромагнетиками<sup>\*1</sup>. В случае, когда подрешеток больше двух, их скос может не приводить к появлению спонтанного момента<sup>\*2</sup>. В некоторых четырехподрешеточных антиферромагнетиках (например,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [41],  $\text{CoSO}_4$ ,  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [15]) две подрешетки дают слабый суммарный момент  $+m$ , а две другие —  $m$ , так что полный момент образца равен нулю. Существует много кристаллов (наиболее характерные примеры  $\text{CoF}_2$  [43],  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  при  $T < T_M$ ), в которых при  $H=0$  ВД не приводит к скосу магнитных моментов подрешеток, однако его необходимо учитывать для адекватного описания магнитных свойств таких кристаллов в сильных магнитных полях [44, 45].

## 28.6. ПЬЕЗОМАГНЕТИКИ И МАГНИТОЭЛЕКТРИКИ

**Пьезомагнетики** — это вещества, у которых при наложении упругих напряжений возникает спонтанный магнитный момент, пропорциональный первой степени напряжения. Пьезомагнитный эффект сравнительно мал и практически может быть обнаружен только в антиферромагнетиках, которые не обладают в нормальных условиях спонтанным моментом. Появление спонтанного момента в таких кристаллах объясняется изменением их магнитной структуры вследствие деформации при наложении упругих напряжений [2]. Пьезомагнитная намагниченность  $M_i$  связана с тензором упругих напряжений  $\sigma_{jk}$  соотношением  $M_i = \Lambda_{ijk}\sigma_{jk}$ . Для  $\text{MnF}_2$  и  $\text{CoF}_2$  в соответствии с требованиями симметрии отличны от нуля только три компоненты пьезомагнитного тензора:  $\Lambda_{xyz} = \Lambda_{yxz}$  и  $\Lambda_{zxy}$ . При  $T = 20,4$  К эти компоненты для  $\text{CoF}_2$  имеют значения:  $\Lambda_{xyz} = 2 \cdot 10^{-5}$  А·м/Н,  $\Lambda_{zxy} = 0,8 \cdot 10^{-5}$  А·м/Н [46]. В случае  $\text{MnF}_2$  эффект примерно в 100 раз меньше. Пьезомагнитный эффект обнаружен также в  $\text{FeCO}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и др. [47].

**Магнитоэлектрики** — вещества, у которых при помещении их в электрическое поле возникает магнитный момент, пропорциональный напряженности поля. Впервые магнитоэлектрический эффект был обнаружен в антиферромагнитном кристалле  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Величина эффекта характеризуется тензорным коэффициентом пропорциональности  $\alpha_{ik}$  между возникающей намагниченностью и приложенным электрическим полем. Для  $\text{Cr}_2\text{O}_3$   $\alpha_{zz}$  (250 К)  $= 1,9 \cdot 10^{-5}$  А/В [48]. Магнитоэлектрический эффект обнаружен также в антиферромагнетиках  $\text{Fe}_2\text{TeO}_6$ ,  $\text{Nb}_2\text{Co}_4\text{O}_9$ ,  $\text{Nb}_2\text{MnO}_9$ ,  $\text{Ta}_2\text{Mn}_4\text{O}_9$  [49] и др.<sup>\*3</sup>

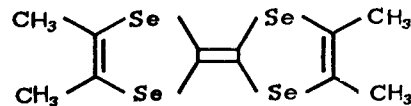
## 28.7. АКУСТОМАГНЕТИКИ

В антиферромагнетиках с высокой температурой Неля квазизвуковые моды, возникающие благодаря связи между упругой (практически линейной) и магнитной (нелинейной) подсистемами, обладают сильной нелинейностью. Эта нелинейность особенно велика, если одна из магнитных мод без учета магнитоупругости оказывается «мягкой» ( $\tilde{\omega}_{\text{рез}} \rightarrow 0$ ), что возможно либо в силу «легкопосконого» характера анизотропии (как в гематите  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  при  $T_M < T < T_N$ ), либо при приближении к точке той или иной спиновой переориентации (как, например, в редкоземельных ортоферритах ( $\text{RFeO}_3$ )). Большая нелинейность приводит к тому, что в антиферромагнетиках указанного класса реализуются звуковые аналоги явля-

ний нелинейной оптики, такие как удвоение частоты звуковой волны, вынужденное комбинационное рассеяние звуковых волн, их самофокусировка и др. [51]. Очень большая магнитоупругая динамическая связь в этих твердых телах позволяет выделить их в технически важный класс кристаллов — *акустомагнетики*.

## 28.8. ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

Органические сверхпроводники типа  $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ , основанные на молекуле тетраметилтетраселенфулвалена



и имеющие в качестве  $\text{X}^-$  один из симметричных октаэдрических анионов  $\text{PF}_6^-$ ,  $\text{AsF}_6^-$ ,  $\text{SbF}_6^-$  и  $\text{TaF}_6^-$ , обнаруживают сверхпроводимость при небольших давлениях  $p = (0-18) \cdot 10^8$  Па и  $T \approx 1$  К. Некоторые из этих соединений ниже точки перехода металл — диэлектрик обладают антиферромагнитным упорядочением, характеризующимся волной спиновой плотности. Антиферромагнитное упорядочение зафиксировано в  $(\text{TMTSF})_2\text{AsF}_6$  и  $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$  при  $T < T_c \approx 12$  К<sup>\*1</sup> [53, 54]. Из измерений магнитной восприимчивости на монокристаллических образцах [53] следует, что в  $(\text{TMTSF})_2\text{AsF}_6$  реализуется простая антиферромагнитная структура с легкой, промежуточной и трудной осями, направленными соответственно вдоль  $a$ ,  $b'$  и  $c'$  [триклинную структуру  $(\text{TMTSF})_2\text{X}$  обычно аппроксимируют орторомбической с осями  $a$ ,  $b'$ ,  $c'$ , определяемыми главными осями тензора электрического сопротивления]. В  $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$  сверхпроводящее состояние возникает при атмосферном давлении и  $T \approx 1,3$  К, а антиферромагнетизм наблюдается при  $T < 6$  К [55] после быстрого охлаждения.

## 28.9. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Помещаемый здесь справочный материал относится в основном к магнитным свойствам диэлектриков, обладающих антиферромагнитным упорядочением. Кроме того, приведены свойства некоторых антиферромагнитных полупроводников, металлов и металлических сплавов<sup>\*2</sup>.

Таблица 28.1 не охватывает всех известных к моменту издания справочника антиферромагнетиков. Составители стремились дать общее представление о свойствах различных типов антиферромагнитных кристаллов, начиная от наиболее известных и хорошо изученных антиферромагнитных диэлектриков и кончая недавно открытыми сверхпроводящими соединениями. Важным, хотя и не необходимым, критерием отбора материала служил факт установления в соединении антиферромагнитной структуры методом нейтронной дифракции. Не было возможности с максимальной полнотой привести данные о некоторых группах соединений. Так, практически не представлена (кроме двух веществ) обширная группа

<sup>\*1</sup> В зарубежной литературе их называют скошенными (cantel) антиферромагнетиками, а термин «слабый ферромагнетизм» относят к ферромагнетизму не локализованных электронов, имеющему место в  $\text{ZrZn}_2$  и т. п.).

<sup>\*2</sup> В зарубежной литературе — «скрытое скашивание» (hidden canting).

<sup>\*3</sup> Подробная классификация материалов по их магнитным, электрическим и упругим свойствам, выполненная на основе кристалломагнитной симметрии, дана в обзоре [50].

<sup>\*1</sup> Подробнее о природе перехода металл — диэлектрик, который не является переходом пайерлсовского типа, а также о связи сверхпроводимости с состоянием, описываемым волной спиновой плотности, см. в [52].

<sup>\*2</sup> В [56] представлены основные классы антиферромагнитных диэлектриков.

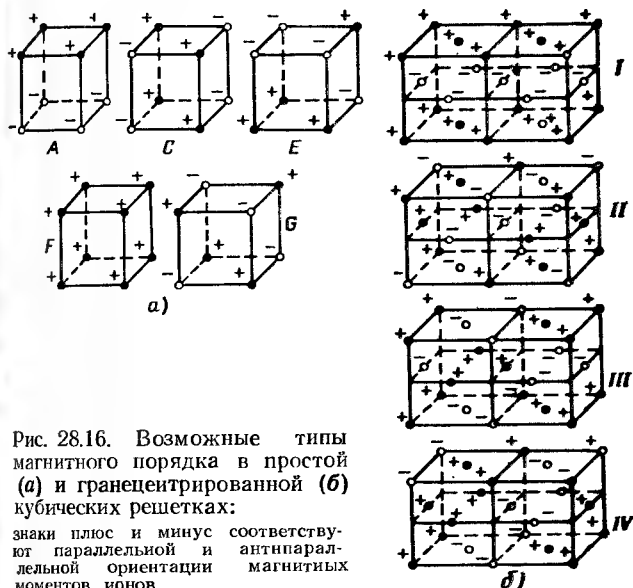


Рис. 28.16. Возможные типы магнитного порядка в простой (а) и гранецентрированной (б) кубических решетках;

знаки плюс и минус соответствуют параллельной и антипараллельной ориентации магнитных моментов ионов

антиферромагнетиков со структурой граната<sup>1</sup>. Отсутствуют также сведения о многих редкоземельных сплавах и соединениях<sup>2</sup>.

Информация о магнитной структуре многих антиферромагнетиков, исследованных методом нейтронной дифракции, содержится в [3]. Типы магнитного упорядочения в кубических решетках приведены на рис. 28.16.

Последовательность расположения веществ в табл. 28.1 соответствует порядковому номеру магнитного атома в таблице Менделеева. Соединения с одним и тем же магнитным атомом расположены в порядке возрастающей сложности (например, соединения, состоящие из трех элементов вида  $R_i A_k B_l$  с магнитным атомом R, расположены в порядке возрастания числа  $n = 100i + 10k + l$ ). При одинаковых числах  $n$  соединения расположены в порядке расположения атомов А и В в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

#### Условные обозначения и принятые в табл. 28.1 сокращения

I, II, III, IV — возможные типы магнитного порядка в гранецентрированной кубической решетке (рис. 28.16, б);

A, C, E, F, G — возможные типы магнитного порядка в простой кубической решетке (рис. 28.16, а);

[a], [b], [c] — кристаллографические оси в триклинной, моноклинной, орторомбической и гексагональной сингониях;

(ab), (bc), (ac) — кристаллографические плоскости в триклинной, моноклинной и орторомбической сингониях;

$a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$  — векторы обратной решетки;

C — ось наивысшей симметрии в тетрагональной, тригональной, гексагональной сингониях;

D — спиновая размерность, определяемая числом ортогональных компонент спина;

$d$  — размерность магнитной решетки, определяемая пространственной анизотропией обменного взаимодействия<sup>3</sup>;

$E_g$  — ширина энергетической щели в спектре электронных возбуждений для веществ, обладающих свойствами полупроводников;

F, G, C, A — векторы, образованные линейной комбинацией магнитных моментов в четырехподрешеточной модели

антиферромагнетика<sup>2</sup>:

$$F = (1/4) (M_1 + M_2 + M_3 + M_4);$$

$$G = (1/4) (M_1 - M_2 + M_3 - M_4);$$

$$C = (1/4) (M_1 + M_2 - M_3 - M_4);$$

$$A = (1/4) (M_1 - M_2 - M_3 + M_4);$$

$H_A$  — напряженность эффективного поля магнитной анизотропии<sup>3</sup>;

$H_c$  — напряженность внешнего магнитного поля, при которой наблюдается та или иная особенность в зависимости намагниченности вещества от магнитного поля;

$H_{c2}(0)$  — верхнее («второе») критическое значение напряженности поля при  $T=0$  К для сверхпроводника второго рода;

$H_D$  — напряженность эффективного поля, связанного с взаимодействием Дзялошинского (см. § 28.5);

$H_E$  — напряженность эффективного обменного поля;

$H_{рез}$  — напряженность магнитного поля, при которой наблюдается антиферромагнитный резонанс;

$\Delta H_{рез}$  — ширина линии антиферромагнитного резонанса по магнитному полю;

$J$  — константа, характеризующая обменное взаимодействие между соседними магнитными ионами в изотропных системах или же между соседними магнитными ионами внутри линейных цепей в квазиодномерных ( $d=1$ ) системах либо внутри плоскостей в квазидвумерных ( $d=2$ ) системах;

$J'$  — константа, характеризующая об-

<sup>1</sup> При модельном описании поведения антиферромагнетиков обычно рассматривают обменный гамильтониан  $H = \sum_{ij} J_{ij}^{\parallel} S_i^z S_j^z + J_{ij}^{\perp} (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y)$ , при этом модели Гейзенберга ( $D=3$ ) соответствует случай  $J_{ij}^{\parallel} = J$ , модели Изинга ( $D=1$ )  $J_{ij}^{\perp} = 0$ , XY-модели ( $D=2$ )  $J_{ij}^{\parallel} J_{ij}^{\perp} = 0$ . Если  $J_{ij}^{\parallel} \neq J_{ij}^{\perp}$ , то говорят о спиновой анизотропии обменного взаимодействия. Если  $J(R_{ij})$  по-разному зависят от  $R$  вдоль различных главных направлений кристалла, то говорят о пространственной анизотропии обменного взаимодействия.

<sup>2</sup> Устойчивую спиновую конфигурацию (магнитный порядок) в антиферромагнитных кристаллах часто описывают с помощью инвариантов второго порядка, образованных из компонент векторов F, G, C, A и преобразующихся по одному неприводимому представлению пространственной группы кристаллов [11].

<sup>3</sup> В таблице даны числовые значения магнитной индукции, соответствующие значениям напряженности магнитного поля в СИ (для вакуума справедливо соотношение  $1 \text{ Тл} = \mu_0 \cdot 1 \text{ А/м}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ). Если не указана конкретная температура, то значение относится к  $T \ll T_N$ .

<sup>1</sup> Сведения о них можно найти в [57].

<sup>2</sup> Данные по антиферромагнетизму этих соединений см. в [56].

менное взаимодействие между магнитными ионами, принадлежащими соседним линейным цепям в квазиодномерных ( $d=1$ ) системах либо соседним плоскостям в квазидвумерных ( $d=2$ ) системах;

$la, mb, nc$  — магнитная ячейка (в  $m, l, n$  раз увеличивается размер магнитной ячейки по сравнению с кристаллографической ячейкой соответственно вдоль кристаллографических осей  $a, b$  и  $c$ );

$n_s$  — число магнетонов Бора на атом в состоянии насыщения;

$p$  — эффективное число магнетонов Бора на атом в выражении, определяющем  $C_m$  ( $C_m = Np^2\mu_B/3k$ );

$T_N, T_N(A)$  — температура антиферромагнитного упорядочивания, температура упорядочивания ионов  $A^{*1}$ ;

$T_H$  — температура переориентации магнитных моментов относительно кристаллографических осей;

$\alpha(\mu, [ikl])$  — угол между направлением магнитного момента  $\mu$  и кристаллографической осью  $[ikl]$ ;

$\theta, C_m$  — постоянные в законе Кюри — Вейсса,  $\chi_m = C_m/(T - \theta)$  (как правило,  $\theta < 0$ );

$\lambda(0)$  — длина волны электромагнитного излучения, соответствующая частоте антиферромагнитного резонанса в нулевом магнитном поле (при  $T \ll T_N$ );

$\mu$  — магнитный момент иона (атома);

$\mu_A(T)^{*2}$  — магнитный момент иона (атома)  $A$  при температуре  $T$  (в магнетонах Бора  $\mu_B$ );

$\Delta\nu_Z$  — частота ядерного магнитного резонанса, соответствующая внутреннему магнитному полю на ядре  $AZ$ , где  $A$  — массовое число изотопа элемента  $Z$ ;

$\rho$  — удельное сопротивление;

$\sigma_m(T)^{*3}$  — молярный спонтанный магнитный момент при температуре  $T$ ,  $A \cdot m^2/\text{моль}$  (1 ед. СГСМ =  $10^{-3}$  ед. СИ);

$\sigma_{уд}(T)$  — удельный спонтанный магнитный момент при температуре  $T$ ,  $A \cdot m^2/\text{кг}$  (1 ед. СГСМ = 1 ед. СИ);

$\chi_m$  — молярная магнитная восприимчивость,  $\text{см}^3/\text{моль}$  (1 ед. СГСМ =  $4\pi$  ед. СИ);

$\chi_{уд}$  — удельная магнитная восприимчивость,  $\text{см}^3/\text{г}$  (1 ед. СГСМ =  $4\pi$  ед. СИ);

\* \* \*

**АФ** — антиферромагнитное состояние;

**АФВ** между  $(ikl)$  — антиферромагнитное взаимодействие между магнитными атомами, принадлежащими соседним плоскостям  $(ikl)$ , которое приводит к антипараллельной ориентации магнитных моментов атомов соседних плоскостей  $(ikl)$ ;

**АФМР** — антиферромагнитный резонанс;

**ВСП** — волна спиновой плотности;

**ГС** — геликондальная магнитная структура ( $k_0$  — вектор распространения геликонда);

**КС** — коллинеарная магнитная структура;

**ЛО** — легкая ось;

**ЛП** — легкая плоскость;

**МП** — магнитный порядок;

**НКС** — неколлинеарная магнитная структура;

**П** — парамагнитное состояние;

**СВ** — синусоидально модулированная магнитная структура (спиновая волна);

**СФ** — слабое ферромагнитное состояние;

**Ф** — ферромагнитное состояние;

**ФВ (АФВ)** в  $(ikl)$  — ферромагнитное (антиферромагнитное) обменное взаимодействие между магнитными атомами, принадлежащими одной плоскости  $(ikl)$ , которое приводит к параллельной (антипараллельной) ориентации магнитных моментов атомов плоскости  $(ikl)$ ;

**ЯМР** — ядерный магнитный резонанс.

\* \* \*

Индексы в обозначениях отдельных физических величин<sup>\*1</sup>:

$||(\perp)$  — данная величина относится к направлению, параллельному (перпендикулярному) выделенной в кристалле оси;

$[ikl], [a], [b], [c]$  — данное значение относится к соответствующему кристаллографическому направлению.

<sup>\*1</sup> Значения температуры Нееля  $T_N$ , приведенные в табл. 28.1, получены в основном из данных измерений магнитной восприимчивости или нейтронного рассеяния. Значения  $T_N$ , полученные из данных измерений теплоемкости (это отмечено в сносках), как правило, несколько от них отличаются.

<sup>\*2</sup>  $\mu_A$  (0 К) — значение при  $T \rightarrow 0$  К.

<sup>\*3</sup>  $\delta$  (0 К) — значение при  $T \rightarrow 0$  К.

<sup>\*1</sup> Те же индексы, стоящие при числовых значениях, означают, что измерение проводилось в соответствующем направлении.

Таблица 28.1. Некоторые свойства антиферромагнетиков

| Вещество                   | Структура                                                       |                                                        | $T_N, K$                  | Дополнительные сведения                                                                          | Литература |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                            | кристаллографическая                                            | магнитная                                              |                           |                                                                                                  |            |
| $\alpha\text{-O}_2$        | Моноклинная $C_{2h}^3$                                          | КС, $\mu \parallel [010]$                              | 23,9                      | $\mu_{O_2}(4,2 K) = 2 \mu_B$                                                                     | [3]        |
| $\alpha\text{-KCO}_2^{*1}$ | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                                    | $\mu \parallel (001)$<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001) | 7                         | $\theta = -3 K$<br>$\rho = 1,03$ } $T < 150 K$<br>$\theta = -53 K$<br>$\rho = 1,2$ } $T > 150 K$ | [3, 17]    |
| $\text{LaTiO}_3$           | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | G-тип МП (Ti)                                          | 125                       | $\mu_{Ti^{3+}}(10 K) = 0,45 \mu_B$<br>Металлическая проводимость при $T > 125 K$                 | [59]       |
| $\alpha\text{-VS}$         | Гексагональная $D_{6h}^4$                                       | —                                                      | 1040<br>900 <sup>*2</sup> | $\theta = -3000 K$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi =$<br>$= 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{моль}$     | [17]       |
| $\alpha\text{-VSe}$        | Гексагональная $D_{6h}^4$                                       | —                                                      | 163                       | $\theta = -2570 K$                                                                               | [17]       |
| $\text{VF}_2$              | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                    | ГС, $k_0 \parallel C$<br>$\mu \perp C$                 | 7                         | $\theta = -80 K$                                                                                 | [3, 17]    |
| $\text{VCl}_3$             | Тригональная $D_{3d}^6$                                         | —                                                      | 30                        | —                                                                                                | [17]       |
| $\text{V}_2\text{O}_3$     | Тригональная $D_{3d}^6$                                         | $\mu \parallel [111]$                                  | 150                       | $\rho(T_N+0)/\rho(T_N-0) \approx 10^9$ <sup>*3</sup><br>$\mu_{V^{3+}} < 0,05 \mu_B$              | [3, 17]    |
| $\text{VOCl}$              | Орторомбическая $D_{2h}^{13}$                                   | КС, $\mu \parallel [a]$                                | 80,5                      | $\mu_V(4 K) = 1,48 \mu_B$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$        | [60]       |
| $\text{LaVO}_3$            | Кубическая $O_h^5$                                              | $\mu \perp C$<br>ФВ в (010)<br>АФВ в (001)             | 133—144                   | $\theta = -665 K$<br>$\mu_V(4,2 K) = 1,31 \mu_B$                                                 | [3]        |
| $\text{V}_2\text{WO}_6$    | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                    | НКС, $\mu \perp C$                                     | 370                       | —                                                                                                | [3]        |
| $\text{MgV}_2\text{O}_4$   | Кубическая $O_h^7$<br>(тетрагональные искажения при $T < T_N$ ) | $\mu \parallel C$                                      | 45                        | $\theta = -750 K$ , $\rho = 3,43$<br>$\mu_{V^{3+}}(4,2 K) = 1,0 \mu_B$                           | [3]        |
| $\text{CaV}_2\text{O}_4$   | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | КС, $\mu \parallel [b]$<br>( $a, 2b, 2c$ )             |                           | $\mu_{V^{3+}}(4,2 K) = 1,0 \mu_B$                                                                | [3]        |

\*1 Магнитные свойства  $\alpha\text{-KCO}_2$  обусловлены наличием неспаренного электрона у 2p-молекулярной орбитали  $\pi$ -типа иона  $O_2^-$ .

\*2 Из измерений теплоемкости.

\*3 Одновременно с переходом П — АФ в  $\text{V}_2\text{O}_3$  происходит переход металл — полупроводник. При  $T = T_N$  электропроводность меняется на девять-десять порядков. Описание электронной структуры и обзор магнитных свойств  $\text{V}_2\text{O}_3$  см. в книге Бугаев А. А., Захарченко Б. М., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл — полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979.

| Вещество                                   | Структура                                                        |                                                                           | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                  | Литература |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                            | кристаллографическая                                             | магнитная                                                                 |           |                                                                                                                                                          |            |
| $ZnV_2O_4$                                 | Кубическая $O_h^7$<br>(тетрагональные искажения при $T < T_N$ )  | КС, $\mu \parallel C$                                                     | 45        | $\theta = -256$ К, $p = 2,18$<br>$\mu_{V^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 0,8 \mu_B$                                                                               | [3]        |
| $\alpha\text{-Cr}$                         | Кубическая $O_h^9$                                               | $\mu \parallel [100]$<br>$T_{SF} \approx 122 \text{ К}^{*1}$              | 312       | $\mu(77 \text{ К}) = 0,59 \mu_B$                                                                                                                         | [1, 3, 61] |
| CrN                                        | Кубическая $O_h^5$<br>(орторомбические искажения при $T < T_N$ ) | IV тип МП, $\mu \parallel [110]$<br>( $2a, 2a, 2a$ )                      | 273       | $\mu_{Cr}(77 \text{ К}) = 2,4 \mu_B$                                                                                                                     | [3]        |
| CrS                                        | Моноклинная $C_{2h}^6$                                           | ФВ в (011)<br>АФВ между (011)                                             | 460       | $\theta = -695$ К, $p = 4,22$<br>$\mu_{Cr}(77 \text{ К}) = 3,4 \mu_B$                                                                                    | [3, 17]    |
| CrAs                                       | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                    | НКС, $k_0 \parallel [c]$                                                  | 260—280   | $\mu_{Cr}(77 \text{ К}) = 2,0 \mu_B$<br>$\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 1,7 \mu_B$                                                                            | [3]        |
| CrSe                                       | Гексагональная $D_{6h}^4$                                        | НКС<br>$\alpha(\mu, C) = 45^\circ$<br>( $3a, 3a, c$ )                     | 200—300   | $p = 4,6$ ,<br>$\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 2,9 \mu_B$                                                                                                     | [3, 17]    |
| CrSb                                       | Гексагональная $D_{6h}^4$                                        | КС<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                                       | 663—723   | $p = 3,89$ ,<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 1,92 \cdot 10^{-3}$<br>$\text{см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_{Cr^{3+}}(290 \text{ К}) = 2,84 \mu_B$                      | [3, 17]    |
| CrRe (сплав с концентрацией Re больше 17%) | ГЦК                                                              | —                                                                         | 160       | Зонный антиферромагнетик; сверхпроводник при $T \leq 3 \text{ К}$                                                                                        | [62]       |
| CrF <sub>2</sub>                           | Моноклинная $C_{2h}^5$                                           | $\mu \parallel (010)$<br>$\alpha(\mu, [c]) = 32^\circ$                    | 53        | $p = 4,3$ , $\mu_{Cr^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,96 \mu_B$                                                                                                  | [3, 17]    |
| CrCl <sub>2</sub>                          | Орторомбическая $D_{2h}^{12}$                                    | КС <sup>*2</sup><br>ФВ в (011)<br>АФВ между (011)<br>( $a, 2b, 2c$ )      | 20        | $\theta = -149$ К<br>$\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 3,68 \mu_B$                                                                                              | [3, 17]    |
| CrSb <sub>2</sub>                          | Орторомбическая $D_{2h}^{12}$                                    | $\mu \parallel [101]$<br>ФВ в (011)<br>АФВ между (011)<br>( $a, 2b, 2c$ ) | 273       | $\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 1,49 \mu_B$                                                                                                                   | [3]        |
| CrF <sub>3</sub>                           | Тригональная $D_{3d}^6$                                          | КС, $\mu \parallel (111)$                                                 | 80        | $\theta = -124$ К<br>$p = 4,1$ , $\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 3 \mu_B$<br>$\sigma(0 \text{ К}) = 169 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$ | [3, 17]    |

\*1 Магнитная структура представляет собой стоячую ВСП с волновым вектором  $Q$  и вектором поляризации  $\eta$ . При  $T < T_{SF}$  — продольная ВСП ( $Q \parallel \eta$ ), при  $T > T_{SF}$  — поперечная ВСП ( $Q \perp \eta$ ).

\*2 Магнитные моменты ионов параллельны длинной связи Cr — Cl.

| Вещество                      | Структура                              |                                                                                 | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Литература |
|-------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                               | кристаллографическая                   | магнитная                                                                       |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |
| $\text{CrCl}_3$               | Тригональная $D_3^3$                   | КС, $\mu \perp C$<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>( $a, a, 2a$ )            | 16,8      | $\theta = 29$ К<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 6,0 \text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_{\text{Cr}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,82\mu_B$<br>$\mu_0 H_c \parallel (1,7 \text{ К}) = 5 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_{c \perp} (1,7 \text{ К}) = 0,26 \text{ Тл}$                                                                                                                                                               | [3, 17]    |
| $\text{CrAu}_4$               | Тетрагональная $D_{4h}^{18}$           | НКС, $\mu \parallel C$                                                          | 380       | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | [3]        |
| $\beta\text{-AlCr}_2$         | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$           | $\alpha(\mu, C) = 65^\circ$                                                     | 598       | $\mu_{\text{Cr}} = 0,92\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | [3]        |
| $\text{Cr}_2\text{As}$        | Тетрагональная $D_{4h}^7$              | $\mu \parallel (001)$<br>( $a, a, 2c$ )                                         | 393—438   | $\theta = -2067 \text{ К}, p = 1,8$<br>$\mu_{\text{Cr I}}(77 \text{ К}) = 1,1\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr II}}(77 \text{ К}) = 1,2\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                     | [3, 17]    |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$       | Тригональная $D_{3d}^6$                | КС, $\mu \parallel C$                                                           | 308       | $p = 2,6, \mu_{\text{Cr}}(4,2 \text{ К}) = 2,8\mu_B$<br>$\mu_0 H_c \parallel (77 \text{ К}) = 5,9 \text{ Тл}$<br>$\lambda(0) = 189 \text{ мкм}$<br>$^{59}\nu_{\text{Cr}}(1,6 \text{ К}) = 70,43 \text{ МГц}^*1$                                                                                                                                                                                          | [3, 17]    |
| $\beta\text{-Cr}_2\text{S}_3$ | Тригональная $C_{3i}^2$                | КС, $\mu \perp C$                                                               | 120—122   | $\theta = -636 \text{ К}$<br>$\mu_{\text{Cr I}}(4,2 \text{ К}) = 1,72\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr II}}(4,2 \text{ К}) = 1,36\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr III}}(4,2 \text{ К}) = 1,82\mu_B$                                                                                                                                                                                                                       | [3]        |
| $\text{Cr}_2\text{O}_5$       |                                        | —                                                                               | 100       | $\theta = -140 \text{ К}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | [17]       |
| $\text{Cr}_3\text{S}_4$       | Моноклинная $C_{2h}^3$                 | $\alpha(\mu, [101]) = 29^\circ$<br>( $2a, b, 2c$ )                              | 280       | $\theta = -547 \text{ К}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | [3, 17]    |
| $\text{Cr}_3\text{Se}_4$      | Моноклинная $C_{2h}^3$                 | $\mu \parallel (10\bar{1})$<br>$\alpha(\mu, [b]) = 30^\circ$<br>( $2a, b, 2c$ ) | 80        | $\theta = -60 \text{ К}$<br>$\mu_{\text{Cr I}}(4,2 \text{ К}) = 4\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr II}}(4,2 \text{ К}) = 3\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                  | [3, 17]    |
| $\text{Cr}_5\text{S}_6$       | Гексагональная $D_{3d}^2$              | ГС, $k_0 \parallel C$ при $T < T_N$                                             | 150—160   | Ферримagnetик при<br>$T_N < T < T_C = 305 \text{ К}$<br>$\Delta\sigma(T_N) = 1,85 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$<br>$\rho = (77 \text{ К}) = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$<br>$\mu_{\text{Cr I}}(4,2 \text{ К}) = 2,98\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr II}}(4,2 \text{ К}) = 2,77\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr III}}(4,2 \text{ К}) = 2,78\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr IV}}(4,2 \text{ К}) = 2,75\mu_B$ | [3, 17]    |
| $\text{LiCrS}_2$              | Тригональная $D_3^2$<br>или $D_{3d}^3$ | НКС                                                                             | 55        | $p = 3,83, \mu_{\text{Cr}}(4,2 \text{ К}) = 2,26\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | [3]        |
| $\text{KCrF}_3$               | Тетрагональная $C_{4h}^{10}$           | $\mu \perp C$<br>А-тип МП                                                       | 40        | $\mu_{\text{Cr}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 4,27 \mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | [3, 17]    |

\*1 См. приложение II в [8].



| Вещество           | Структура                     |                                                                                                                                                                          | $T_N$ , К            | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                           | Литература  |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                    | кристаллографическая          | магнитная                                                                                                                                                                |                      |                                                                                                                                                                                                   |             |
| YCrO <sub>3</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС, $\sigma \parallel [c]$<br>$\mu \parallel [a]$                                                                                                                        | 141                  | $\mu_0 H_c [a] = 3,3 \text{ Тл}^{*1}$<br>$\mu_{Cr^{3+}} (4,2 \text{ К}) = 2,96 \mu_B$                                                                                                             | [3, 17]     |
| LaCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | G-тип МП                                                                                                                                                                 | 282—320              | $\theta = -430 \text{ К}$ , $p = 2,76$<br>$\chi_M (T_N) / 4\pi = 1,9 \times 10^{-3} \text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_{Cr^{3+}} (4,2 \text{ К}) = 2,45 \mu_B$                                     | [3, 17, 63] |
| CeCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | —                                                                                                                                                                        | 257 (Cr)             | —                                                                                                                                                                                                 | [3]         |
| PrCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС, $\mu_{Cr} \parallel [a]$<br>$\mu_{Pr} \parallel [c]^{*2}$                                                                                                            | 239 (Cr)             | $\theta = -133 \text{ К}$ , $p = 2,87$<br>$\mu_{Cr^{3+}} (4,2 \text{ К}) = 2,46 \mu_B$<br>$\mu_{Pr^{3+}} (4,2 \text{ К}) = 0,5 \mu_B$                                                             | [3, 17, 63] |
| NdCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС (Cr), $\mu \parallel [a]$ при $T > T_N$ , $T_N = 20 \text{ К}$<br>$\mu \parallel (001)$ $\alpha(\mu, [a]) = 60^\circ$ при $T < T_N$ ;<br>КС (Nd), $\mu \parallel [c]$ | 224 (Cr)<br>10 (Nd)  | $\theta = -292 \text{ К}$ , $p = 2,81$<br>$\mu_{Cr} (4,2 \text{ К}) = 2,55 \mu_B$<br>$\mu_{Nd} (4,2 \text{ К}) = 1,3 \mu_B$                                                                       | [3, 17, 63] |
| SmCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС, $\mu \parallel [a]$ при $T > T_N$ , $T_N = 38 \text{ К}$<br>$\mu \parallel [c]$ при $T < T_N$                                                                       | 192 (Cr)             | —                                                                                                                                                                                                 | [3, 17]     |
| EuCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | —                                                                                                                                                                        | 181 (Cr)             | —                                                                                                                                                                                                 | [17]        |
| GdCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | —                                                                                                                                                                        | 170 (Cr)             | $\theta = -20 \text{ К}$ , $p = 2,8$                                                                                                                                                              | [17, 63]    |
| TbCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС (Cr)<br>НКС (Tb) при $T > T_N$<br>КС (Tb) при $T < T_N$ ,<br>$T_N = 3 \text{ К}$                                                                                      | 158 (Cr)<br>4 (Tb)   | $\theta_{Cr} = -110 \text{ К}$<br>$\mu_{Cr^{3+}} (4,2 \text{ К}) = 2,85 \mu_B$<br>$\mu_{Tb^{3+}} (1,5 \text{ К}) = 8,6 \mu_B$                                                                     | [3, 17]     |
| DyCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС (Cr)<br>$\mu_{Cr} \parallel [c]$<br>НКС (Dy)                                                                                                                          | 146 (Cr)<br>2,1 (Dy) | $\theta_{Cr} = -35 \text{ К}$ ,<br>$\mu_{Cr^{3+}} (1,5 \text{ К}) = 2,76 \mu_B$<br>$\theta_{Dy} = -1 \text{ К}$ , $\mu_{Dy} (1,5 \text{ К}) = 9,6 \mu_B$                                          | [3, 17]     |
| HoCrO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | Изменение структуры Cr при $T_N = 80 \text{ К}$<br>НКС (Ho)                                                                                                              | 141 (Cr)<br>12 (Ho)  | $\theta_{Cr} = -28 \text{ К}$ ,<br>$\mu_{Cr} (4,2 \text{ К}) = 2,94 \mu_B$<br>$\mu_{Ho} (4,2 \text{ К}) = 7 \mu_B$ —<br>АФ-компонента<br>$\mu_{Ho} (4,2 \text{ К}) = 3,4 \mu_B$ —<br>Ф-компонента | [3, 17]     |

\*1 Значение поля опрокидывания подрешеток.

\*2 При  $T = 4,2 \text{ К}$  магнитные моменты Pr обладают ферромагнитным упорядочением.

| Вещество                         | Структура                                                       |                                                                                                                  | $T_N$ , К                          | Дополнительные сведения                                                                                                       | Литература |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                  | кристаллографическая                                            | магнитная                                                                                                        |                                    |                                                                                                                               |            |
| ErCrO <sub>3</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | КС (Cr)<br>$\mu \parallel [a]$ при $T > T_N = 20$ К<br>$\alpha(\mu, [a]) = 55^\circ$ при<br>$T < T_N$<br>КС (Er) | 133 (Cr)<br>16,8 (Er)              | $\mu_{Cr^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,90\mu_B$<br>$\mu_{Er^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 5,2\mu_B$                                       | [3, 17]    |
| TmCrO <sub>3</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | КС (Cr)                                                                                                          | 124 (Cr)<br>$T_c = 4$ К<br>(Tm)*1  | $\mu_{Cr^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,58\mu_B$<br>$\mu_{Tm^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 0,8\mu_B$                                       | [3]        |
| YbCrO <sub>3</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | КС (Cr)                                                                                                          | 158 (Cr)<br>3,0 (Yb)               | $\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 2,80\mu_B$                                                                                         | [3, 17]    |
| LuCrO <sub>3</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | КС, $\mu \parallel (010)$<br>$\alpha(\mu, [a]) = 63^\circ$                                                       | 112 (Cr)                           | $\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 2,51\mu_B$                                                                                         | [3, 17]    |
| PbCrO <sub>3</sub>               | Кубическая $O_h^1$                                              | G-тип МП<br>(2a, 2a, 2a)                                                                                         | 210—250                            | $\theta = -240$ К, $p = 2,83$<br>$\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 1,9\mu_B$                                                         | [3, 17]    |
| CrVO <sub>4</sub>                | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$                                   | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                                                                                    | 50                                 | $\mu_{Cr^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,1\mu_B$ ,<br>$p = 4$                                                                        | [3, 17]    |
| CrUO <sub>4</sub>                | Орторомбическая $D_{2h}^{14}$                                   | КС, $\mu \perp [c]$                                                                                              | 45                                 | $\mu_{Cr} = 2,4\mu_B$                                                                                                         | [3, 17]    |
| CrNb <sub>4</sub> S <sub>8</sub> | Гексагональная $D_{6h}^4$                                       | КС<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                                                                              | —                                  | $\theta = -4$ К при низких температурах<br>$\theta = -243$ К при высоких температурах<br>$\mu_{Cr}(4,2 \text{ К}) = 1,5\mu_B$ | [3]        |
| Cr <sub>2</sub> BeO <sub>4</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | ГС, $k_0 \parallel [c]$<br>$\mu \parallel (010)$                                                                 | 28                                 | $\mu_{Cr \text{ I}}(4,2 \text{ К}) = 1,55\mu_B$<br>$\mu_{Cr \text{ II}}(4,2 \text{ К}) = 2,75\mu_B$                           | [3]        |
| MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Кубическая $O_h^7$<br>(тетрагональные искажения при $T < T_N$ ) | НКС, $\mu \perp (001)$ при<br>$T_N > T > 13,5$ К*2                                                               | 16                                 | $\theta = -350$ К, $p = 3,84$<br>$\mu_{Cr^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,63\mu_B$                                                   | [3]        |
| CoCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Кубическая $O_h^7$                                              | НКС при $T < T_N$<br>(3a, 3a, a)                                                                                 | 31<br>$\Phi \rightarrow \text{АФ}$ | Ферримагнетик при<br>$T_N < T < T_C = 97$ К                                                                                   | [3]        |
| ZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Кубическая $O_h^7$<br>(тетрагональные искажения при $T < T_N$ ) | НКС<br>$\mu \parallel (100)$<br>$\mu \parallel [010]$<br>(2a, 2a, 2a)                                            | 16                                 | $\theta = -392$ К                                                                                                             | [3, 17]    |
| Cr <sub>2</sub> TiS <sub>4</sub> | Моноклинная $C_{2h}^3$                                          | (2a, b, 2c)                                                                                                      | —                                  | —                                                                                                                             | [3]        |

\*1 При  $T < T_C$  магнитные моменты Tm обладают ферромагнитным упорядочением.

\*2 При  $T = 13,5$  К — перестройка АФ-структуры.

| Вещество                                                                             | Структура                                                        |                                                                                                                | $T_N$ , К                              | Дополнительные сведения                                                                                                                                          | Литература |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                      | кристаллографическая                                             | магнитная                                                                                                      |                                        |                                                                                                                                                                  |            |
| $\text{Cr}_2\text{NiS}_4$                                                            | Моноклинная $C_{2h}^3$                                           | ФВ в (101)<br>АФВ между (101)<br>(2a, b, 2c)                                                                   | —                                      | —                                                                                                                                                                | [3]        |
| $\text{ZnCr}_2\text{S}_4$                                                            | Кубическая $O_h^7$                                               | —                                                                                                              | 20                                     | $\theta = 18$ К                                                                                                                                                  | [65]       |
| $\text{HgCr}_2\text{S}_4$                                                            | Кубическая $O_h^7$                                               | НКС при $T < 25$ К                                                                                             | 25<br>$\Phi \rightarrow \text{АФ}$     | Ферромагнетик при<br>$25 \text{ К} < T < T_C = 60 \text{ К}$<br>$\mu_{\text{Cr}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,71\mu_B$                                                | [3]        |
| $\text{ZnCr}_2\text{Se}_4$                                                           | Кубическая $O_h^7$                                               | НКС при $T < T_N$<br>$\mu \parallel (001)$                                                                     | 22<br>( $\Phi \rightarrow \text{АФ}$ ) | $\theta = -115$ К,<br>$\mu_{\text{Cr}}(4,2 \text{ К}) = 3\mu_B$<br>Ферримагнетик при<br>$T_N < T < T_C = 129 \text{ К}$                                          | [3, 17]    |
| $\text{Cr}_2\text{TeO}_6$                                                            | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                     | НКС, $\mu \perp C$                                                                                             | 105                                    | $\mu_{\text{Cr}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,45\mu_B$                                                                                                                | [3, 17]    |
| $\text{Cr}_2\text{WO}_6$                                                             | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                     | НКС, $\mu \perp C$                                                                                             | 69                                     | $\theta = -196$ К,<br>$\mu_{\text{Cr}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,14\mu_B$                                                                                          | [3]        |
| $\text{CrTiNdO}_5$                                                                   | Орторомбическая $D_{2h}^9$                                       | НКС<br>$\mu_{\text{Cr}} \parallel [b]$<br>$\mu_{\text{Cr}} \parallel [c]$<br>$\mu_{\text{Nd}} \parallel (001)$ | 30 (Cr)<br>13 (Nd)                     | $\mu_{\text{Nd}}(1,5 \text{ К}) = 2,89\mu_B$<br>$\mu_{\text{Cr}}(1,5 \text{ К}) = 2,95\mu_B$                                                                     | [3]        |
| $\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$                               | Кубическая $T_h^6$                                               | —                                                                                                              | 0,004                                  | $\chi_M(T_N)/4\pi = 2 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{моль}$                                                                                                       | [17]       |
| $\text{Cr}(\text{CH}_3\text{NH}_2) \cdot (\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ |                                                                  | —                                                                                                              | 0,02                                   | —                                                                                                                                                                | [17]       |
| $\alpha$ -Мп                                                                         | Кубическая $T_d^3$                                               | Сложная многоподрешечная точная                                                                                | 100                                    | $\mu(0 \text{ К}) \approx 0,5\mu_B$ (усредненное значение)                                                                                                       | [2, 3]     |
| $\gamma$ -Мп                                                                         | Кубическая $O_h^5$                                               | I тип МП                                                                                                       | 1370                                   | $\mu = 2,4\mu_B$ , устойчив при<br>$1352 \text{ К} < T < 1416 \text{ К}$                                                                                         | [3]        |
| МпО                                                                                  | Кубическая $O_h^5$<br>(ромбоэдрические искажения при $T < T_N$ ) | $\mu \parallel [110]$<br>II тип МП<br>(2a, 2a, 2a)                                                             | 113—120                                | $\theta = -698$ К, $p = 5,97$<br>$\lambda(0) = 362$ мкм<br>$\mu_{\text{Mn}^{2+}} = 5\mu_B$<br>$^{55}\gamma_{\text{Mn}}(1,5 \text{ К}) = 618 \text{ МГц}^{*1}$    | [3, 17]    |
| МпР                                                                                  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                    | ГС, $k_0 \parallel [a]$ при<br>$T < T_N$                                                                       | 47<br>( $\Phi \rightarrow \text{АФ}$ ) | Ферромагнетик при<br>$T_N < T < T_C = 291 \text{ К}$<br>$\mu_0 H_{c,[c]}(4,2 \text{ К}) = 0,24 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_{c,[b]}(4,2 \text{ К}) = 0,62 \text{ Тл}$ | [3, 17]    |

\*1 См. приложение II в [8].

| Вещество       | Структура                                                             |                                                                                                            | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                   | Литература |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                | кристаллографическая                                                  | магнитная                                                                                                  |           |                                                                                                                                                                           |            |
| $\alpha$ -MnS  | Кубическая $O_h^5$                                                    | II тип МП<br>$\mu \parallel (111)$<br>(2a, 2a, 2a)                                                         | 146—155   | $\theta = -465$ К, $\mu_{Mn^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 5\mu_B$                                                                                                                | [3]        |
| $\beta$ -MnS   | Кубическая $T_d^3$                                                    | III тип МП<br>(a, 2a, a)                                                                                   | 150       | $\theta = -982$ К, $\mu_{Mn^{2+}}(4,7 \text{ К}) = 5\mu_B$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 6 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль                                                  | [3, 17]    |
| MnSe           | Кубическая $O_h^5$                                                    | II тип МП<br>$\mu \perp [111]$<br>(2a, 2a, 2a)                                                             | 147—150   | $\theta = -740$ К, $\chi_M(T_N)/4\pi = 19 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>Полупроводник, $E_g = 0,68$ эВ                                                          | [3, 17]    |
| MnTe           | Гексагональная $D_{6h}^4$                                             | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>$\mu \parallel (001)$                                                     | 307—310   | $\theta = -692$ К, $p = 5,97$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 4,6 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_{Mn^{2+}}(290 \text{ К}) = 4,6\mu_B$<br>Полупроводник, $E_g = 1$ эВ | [3, 17]    |
| MnNi           | Тетрагональная $D_{4h}^1$                                             | $\mu \perp C$                                                                                              | 1070—1140 | $\mu_{Mn}(0 \text{ К}) = 4\mu_B$<br>$\mu_{Ni}(0 \text{ К}) < 0,6\mu_B$                                                                                                    | [3, 17]    |
| $\gamma$ -MnNi | Кубическая $O_h^5$                                                    | —                                                                                                          | 453       | $\mu_{Mn} = 1,5\mu_B$                                                                                                                                                     | [3]        |
| MnCu           | Тетрагональная                                                        | $\mu \parallel C$                                                                                          | 300       | Сплав (69—85% Mn)                                                                                                                                                         | [17]       |
| MnPd           | Тетрагональная $D_{4h}^1$                                             | *1                                                                                                         | 813—825   | $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 4,0\mu_B$<br>$\mu_{Pd}(4,2 \text{ К}) < 0,2\mu_B$                                                                                              | [3]        |
| MnRh           | Кубическая $O_h^1$<br>(тетрагональные<br>искажения при<br>$T < T_N$ ) | —                                                                                                          | 170       | $\theta = -260$ К                                                                                                                                                         | [17]       |
| MnPt           | Тетрагональная $D_{4h}^1$                                             | Изменение структуры<br>при $T = 710$ К<br>(2a, 2a, c)                                                      | 970       | $\mu_{Mn}(290 \text{ К}) = 4,3\mu_B$                                                                                                                                      | [3]        |
| $\beta$ -MnAu  | Тетрагональная $O_h^1$                                                | A-тип МП<br>(a, a, 2a)                                                                                     | 513       | $\theta = -600$ К, $p = 3,9$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 4,3 \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль                                                                             | [3, 17]    |
| MnHg           | Кубическая $O_h^1$                                                    | G-тип МП<br>$\mu \parallel [001]$ при $T < 198$ К<br>$\mu \parallel [111]$ при $T > 198$ К<br>(2a, 2a, 2a) | 460       | $\chi_M(T_N)/4\pi = 9,4 \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\rho(T_N) = 5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м<br>$\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 3,7\mu_B$                               | [3, 17]    |

\*1 Возможные магнитные структуры см. в [3].

| Вещество                  | Структура                    |                                                                                                 | $T_N, T$ | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Литература |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                           | кристаллографическая         | магнитная                                                                                       |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |
| IrMn                      | Тетрагональная $D_{4h}^1$    | АФВ в (001)                                                                                     | $> 1200$ | $\mu_{Mn} (290 K) = 3,4\mu_B$<br>$\mu_{Ir} (290 K) = 0,2\mu_B$ (49% Ir)                                                                                                                                                                                                                                                                          | [3]        |
| MnB <sub>2</sub>          | Гексагональная $D_{6h}^1$    | $\mu \perp C$<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>( $a, a, 2c$ )                                | $> 885$  | $\mu_{Mn} (77 K) = 2,6\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | [3]        |
| $\beta$ -MnO <sub>2</sub> | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$ | ГС                                                                                              | 84—94    | $\theta = 1050 K, p = 5,52$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | [3, 17]    |
| MnS <sub>2</sub>          | Кубическая $T_h^6$           | III тип МП<br>$\mu \parallel [010]$<br>( $a, 2a, a$ )                                           | 48       | $\theta = -592 K, p = 6,3$<br>$\mu_{Mn^{2+}} (4,2 K) = 5\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                   | [3, 17]    |
| MnSe <sub>2</sub>         | Кубическая $T_h^6$           | $\mu \parallel [010]$<br>( $a, 3a, a$ )                                                         | 75       | $\theta = -483 K, p = 5,93$<br>$\mu_{Mn^{2+}} (4,2 K) = 5\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                  | [3, 17]    |
| MnTe <sub>2</sub>         | Кубическая $T_h^6$           | I тип МП<br>$\mu \parallel (001)$                                                               | 84       | $\theta = -528 K, p = 6,22$<br>$\mu_{Mn^{2+}} (4,2 K) = 5\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                  | [3, 17]    |
| MnF <sub>2</sub>          | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$ | $\mu \parallel C$                                                                               | 67,3     | $\theta = -113 K,$<br>$\chi_{M\perp} (0K)/4\pi =$<br>$= 25 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{моль},$<br>$\lambda (0) = 1,11 \text{ мм}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel} (4,2 K) = 9,33 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 \Delta H_{\text{рез}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Тл при}$<br>$\nu_{\text{АФМР}} = 23 \text{ ГГц}$<br>$55\nu_{Mn} (0K) = 680 \text{ МГц}^{*1}$ | [3, 17]    |
| MnCl <sub>2</sub>         | Тригональная $D_{3d}^5$      | $\alpha (\mu, C) = 57^\circ$ при $T < T_N$<br>$\mu \parallel [a]$ при $T < T_H =$<br>$= 1,82 K$ | 1,96     | $\theta = -3,3 K, p = 5,73$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | [3, 17]    |
| MnBr <sub>2</sub>         | Тригональная $D_{3d}^3$      | КС* <sup>2</sup>                                                                                | 2,16     | $\theta = -4,66 K,$<br>$\mu_{Mn} (1,35 K) = 5\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                              | [3, 17]    |
| MnI <sub>2</sub>          | Тригональная $D_{3d}^3$      | ГС* <sup>3</sup>                                                                                | 3,4      | $\mu_{Mn} (1,3 K) = 4,6\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | [3, 17]    |
| MnSn <sub>2</sub>         | Тетрагональная $D_{4h}^{18}$ | Изменение структуры при<br>$T = 73 K$                                                           | 323—325  | $\mu_{Mn} (4,2 K) = 2,33\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | [3, 17]    |
| MnAu <sub>2</sub>         | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$ | ГС                                                                                              | 363—370  | $\mu_{Mn^{2+}} (290 K) = 3,04\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | [3, 17]    |

\*<sup>1</sup> См. приложение II в [8].\*<sup>2</sup> Плоскости (011) с ферромагнитным упорядочением чередуются в последовательности ++--.\*<sup>3</sup> Ферромагнитное упорядочение в плоскости (307). Магнитные моменты в соседних плоскостях (307) повернуты на угол  $\pi/16$ .

| Вещество                        | Структура                                                             |                                                        | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                             | Литература |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                 | кристаллографическая                                                  | магнитная                                              |           |                                                                                                                                     |            |
| MnF <sub>3</sub>                | Моноклинная $C_{2h}^6$                                                | $\mu \parallel (101)$                                  | 47        | $\theta = 8$ К, $p = 5$<br>$\mu_{Mn^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 4\mu_B$                                                                  | [3, 17]    |
| $\alpha$ -MnZn <sub>3</sub>     | Кубическая $O_h^1$<br>(тетрагональные<br>искажения при<br>$T < T_N$ ) | A-тип МП<br>( $a$ , $a$ , $2a$ )                       | 155       | —                                                                                                                                   | [3]        |
| MnPd <sub>3</sub>               | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                                          | $\mu \perp C$                                          | 220       | $\mu_{Mn}(77 \text{ К}) = 4,1\mu_B$                                                                                                 | [3]        |
| MnAu <sub>3</sub>               | —                                                                     | —                                                      | 145       | $\theta = 200$ К                                                                                                                    | [17]       |
| Mn <sub>2</sub> N               | Орторомбическая $D_{2h}^{14}$                                         | НКС                                                    | 301       | $\mu_{Mn}(120 \text{ К}) = 1,6\mu_B$                                                                                                | [3]        |
| Mn <sub>2</sub> P               | Гексагональная $D_{3h}^3$                                             | —                                                      | 103—110   | $\mu_{Mn \text{ I}}(4,2 \text{ К}) = 0,02\mu_B$<br>$\mu_{Mn \text{ II}}(4,2 \text{ К}) = 1,68\mu_B$                                 | [3]        |
| Mn <sub>2</sub> As              | Тетрагональная $D_{4h}^7$                                             | $\mu \parallel (001)$<br>( $a$ , $a$ , $2c$ )          | 573       | $\theta = -1947$ К, $p = 2,58$<br>$\mu_{Mn \text{ I}}(290 \text{ К}) = 3,7\mu_B$<br>$\mu_{Mn \text{ II}}(290 \text{ К}) = 3,5\mu_B$ | [3, 17]    |
| YMn <sub>2</sub>                | Кубическая $O_h^7$                                                    | —                                                      | 100       | $\mu_{Mn} = 2,7\mu_B$                                                                                                               | [65]       |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | Кубическая $T_h^7$                                                    | —                                                      | 80        | —                                                                                                                                   | [17]       |
| Au <sub>5</sub> Mn <sub>2</sub> | Моноклинная $C_{2h}^3$                                                | —                                                      | 353       | $\theta = 120$ К, $p = 5,56$                                                                                                        | [3]        |
| Mn <sub>2</sub> Hg <sub>6</sub> | Тетрагональная $D_{4h}^5$                                             | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>$\mu \perp C$         | 342       | $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 4,5\mu_B$                                                                                                | [3]        |
| Mn <sub>3</sub> Rh              | Кубическая $O_h^1$                                                    | НКС<br>$\mu \parallel (111)$                           | 853       | $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 3,5\mu_B$                                                                                                | [3]        |
| Mn <sub>3</sub> Sn              | Гексагональная $D_{6h}^4$                                             | ГС, $k_0 \parallel C$ при $T < T_H =$<br>$= 270$ К     | 420       | $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 2,5\mu_B$                                                                                                | [3]        |
| Mn <sub>3</sub> Pt              | Кубическая $O_h^1$                                                    | КС при $T > T_H$<br>НКС при $T < T_H$<br>$T_H = 365$ К | 475       | $\mu_{Mn}(77 \text{ К}) = 3,0\mu_B$                                                                                                 | [3]        |
| Pd <sub>3</sub> Mn <sub>2</sub> | —                                                                     | —                                                      | 593       | $\theta = -430$ К<br>$\chi_M(T_N)/4\pi =$<br>$= 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{моль}$                                           | [17]       |

| Вещество    | Структура                     |                                                     | $T_N$ , К                           | Дополнительные сведения                                                                                                                                             | Литература  |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|             | кристаллографическая          | магнитная                                           |                                     |                                                                                                                                                                     |             |
| $Mn_3Ge_2$  | —                             | —                                                   | 164<br>( $\Phi \rightarrow A\Phi$ ) | Ферромагнетик при<br>$T_N < T < T_C = 283$ К<br>$\Delta\sigma$ (164 К) = 3,5 А·м <sup>2</sup> /кг                                                                   | [17]        |
| $Mn_5Si_3$  | Гексагональная $D_{6h}^3$     | $\mu \perp C$<br>(2a, a, c)                         | 62—68                               | $\theta = -9,1$ К, $p = 4,05$<br>$\mu_{Mn I}$ (4,2 К) = 0,4 $\mu_B$<br>$\mu_{Mn II}$ (4,2 К) = 1,2 $\mu_B$                                                          | [3]         |
| $MnOOH$     | Моноклинная $C_{2h}^2$        | Модулированная с периодом 0,488 нм                  | 40                                  | —                                                                                                                                                                   | [3]         |
| $FeMnAs$    | Тетрагональная $D_{4h}^7$     | $\mu \perp C$<br>(a, a, 2c)                         | 463                                 | $\mu_{Fe}$ (290 К) = 0,2 $\mu_B$<br>$\mu_{Mn}$ (290 К) = 3,6 $\mu_B$                                                                                                | [3]         |
| $CuMnSb$    | Кубическая $T_d^2$            | III тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>(2a, 2a, 2a) | 38                                  | $\mu_{Mn}$ (4,2 К) = 3,9 $\mu_B$                                                                                                                                    | [3]         |
| $MnCO_3$    | Тригональная $D_{3d}^6$       | $\sigma \perp C$<br>(анизотропия типа ЛП)           | 32,5                                | $\theta = -64,5$ К, $\sigma(0K) = 18,8 \cdot 10^2$ А·м <sup>2</sup> /моль<br>$\lambda(0) = 2,44$ мм<br>$\mu_0 H_D = 0,44$ Тл<br>$^{55}\mu_{Mn}$ (4,2 К) = 640 МГц*1 | [3, 17, 31] |
| $MnSiO_3$   | Триклинная                    | —                                                   | —                                   | $\theta = -45$ К, $p = 5,91$                                                                                                                                        | [17]        |
| $CaMnO_3$   | Кубическая $O_h^1$            | C-тип МП<br>(2a, 2a, 2a)                            | 123—130                             | $\theta = -425$ К, $\sigma(0K) \neq 0$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 4,7 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_{Mn^{++}} = 2,43 \mu_B$                              | [3, 17]     |
| $Ca_2MnO_4$ | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | (a $\sqrt{2}$ , a $\sqrt{2}$ , 2c)                  | 114                                 | $\mu_{Mn^{++}}$ (4,2 К) = 2,0 $\mu_B$                                                                                                                               | [3]         |
| $ScMnO_3$   | Гексагональная $C_{6v}^3$     | НКС                                                 | 120                                 | $\mu_{Mn}$ (4,2 К) $\approx 4,0 \mu_B$                                                                                                                              | [3, 17]     |
| $MnTiO_3$   | Тригональная $C_{3i}^2$       | $\mu \parallel [111]$                               | 60—65                               | $\theta = -219$ К, $p = 5,93$<br>$\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 К) = 4,55 $\mu_B$<br>$\mu_0 H_{c \parallel} = 5,2$ Тл                                                         | [3, 17]     |
| $MnGeO_3$   | Орторомбическая $D_{2h}^{15}$ | $\mu \parallel [b]$                                 | 16                                  | $\theta = -46$ К, $p = 5,48$<br>$\mu_{Mn I}$ (1,1 К) = 4,37 $\mu_B$<br>$\mu_{Mn II}$ (1,1 К) = 4,27 $\mu_B$                                                         | [3, 17]     |
| $MnYO_3$    | Гексагональная $C_{6v}^3$     | $\mu \perp C$                                       | 46                                  | $\theta = -475$ К, $\sigma(0 K) \neq 0$                                                                                                                             | [3, 17]     |

\*1 См. приложение II в [8].

| Вещество           | Структура                                          |                                                                              | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Литература     |
|--------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|                    | кристаллографическая                               | магнитная                                                                    |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| BaMnO <sub>3</sub> | Гексагональная $D_{6h}^4$                          | КС, $\mu \parallel C$<br>( $a\sqrt{3}$ , $a\sqrt{3}$ , $c$ )                 | 2,3       | $\mu_{Mn}(1,8\text{ К}) = 3,0\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | [3]            |
| SrMnO <sub>3</sub> | Кубическая $O_h^1$                                 | G-тип МП<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                                           | 260       | $\mu_{Mn^{4+}}(77\text{ К}) = 2,6\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | [3]            |
| LaMnO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                      | НКС<br>$A_xF_y$ -тип МП                                                      | 100—150   | $\theta = 40\text{ К}$ , $\sigma(0\text{ К}) = 1,21\text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{моль}$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 48,4 \times 10^{-3}\text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_{Mn^{2+}}(4,2\text{ К}) = 3,7\mu_B$                                                                                                                                                                 | [3, 17]        |
| PrMnO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                      | КС, $\mu \parallel [b]$                                                      | 91        | $\mu_{Mn^{2+}}(1,5\text{ К}) = 1,77\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | [3]            |
| NdMnO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                      | КС, $\mu \parallel (001)$<br>$\alpha(\mu, [b]) = 36^\circ$                   | 85        | $\mu_{Mn^{2+}}(1,5\text{ К}) = 1,71\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | [3]            |
| HoMnO <sub>3</sub> | Гексагональная $C_{6v}^3$                          | $\mu \parallel C$ при $T < T_N = 50\text{ К}$<br>$\mu \perp C$ при $T > T_N$ | 76        | $\mu_{Mn}(4,2\text{ К}) = 3,5\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | [3, 17]        |
| ErMnO <sub>3</sub> | Гексагональная $C_{6v}^3$                          | НКС<br>$\alpha(\mu, C) = 70^\circ$                                           | 79        | $\mu_{Mn}(4,2\text{ К}) = 3,5\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | [3, 17]        |
| TmMnO <sub>3</sub> | Гексагональная $C_{6v}^3$                          | НКС<br>$\alpha(\mu, C) = 45^\circ$                                           | 86        | $\mu_{Mn}(4,2\text{ К}) = 3,8\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | [3, 17]        |
| LuMnO <sub>3</sub> | Гексагональная $C_{6v}^3$                          | НКС<br>$\alpha(\mu, C) = 55^\circ$                                           | 91        | $\mu_{Mn}(4,2\text{ К}) = 3,7\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | [3, 17]        |
| NaMnF <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                      | G-тип МП<br>$\sigma \parallel [c]$                                           | 67        | $\mu_0 H_E = 39,0\text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_D = 0,43\text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_A = 2 \cdot 10^{-2}\text{ Тл}$                                                                                                                                                                                                                                                                  | [3, 17]        |
| KMnF <sub>3</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^5$<br>при $T < 91\text{ К}$ | G-тип МП<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                                           | 88        | $\theta = -238\text{ К}$<br>$\sigma_M(4,2\text{ К}) = 19,3 \times 10^{-3}\text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{моль}^{*1}$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 17,7 \times 10^{-3}\text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_{Mn^{2+}}(4,2\text{ К}) = 5,06\mu_B$<br>$\mu_0 H_D = 4,5 \cdot 10^{-2}\text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_E = 86,8\text{ Тл}$<br>$^{55}\nu_{Mn}(4,2\text{ К}) = 676\text{ МГц}^{*2}$ | [3, 6, 17]     |
| RbMnF <sub>3</sub> | Кубическая $O_h^1$                                 | G-тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                  | 83        | $\theta = -118\text{ К}$<br>$\mu_0 H_c \parallel = 0,28\text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_A = 4 \cdot 10^{-4}\text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_E = 89\text{ Тл}$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 17,7 \times 10^{-3}\text{ см}^3/\text{моль}$                                                                                                                                                          | [3, 6, 17, 66] |

\*<sup>1</sup> Спонтанный момент в KMnF<sub>3</sub> появляется при температуре  $T = 81,5\text{ К}$ . Изменение структуры при  $T_c = 81,5\text{ К}$  представляет собой фазовый переход первого рода.

\*<sup>2</sup> См. приложение II в [8].



| Вещество                          | Структура                                                        |                                                | $T_N$ , К         | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                      | Литература     |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|                                   | кристаллографическая                                             | магнитная                                      |                   |                                                                                                                                                                                                                                              |                |
| CsMnF <sub>3</sub>                | Гексагональная $D_{6h}^4$                                        | Анизотропия типа ЛП<br>$\mu \perp C$           | 51—54             | $\mu_0 H_{A\parallel} = 0,75$ Тл* <sup>1</sup><br>$\mu_0 H_{A\perp} = 1,1 \cdot 10^{-4}$ Тл<br>$\mu_0 H_E = 35$ Тл<br>$^{55}\nu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 666$ МГц* <sup>2</sup><br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 3$ | [3, 6, 17, 66] |
| TlMnF <sub>3</sub>                | Кубическая $O_h^1$                                               | G-тип МП                                       | 77                | $\theta = -125$ К, $\mu_0 H_E = 68,0$ Тл<br>$\mu_0 H_A = 0,67$ Тл<br>$\mu(4,2 \text{ К}) = 4,9\mu_B$                                                                                                                                         | [17]           |
| NH <sub>4</sub> MnF <sub>3</sub>  | Кубическая $O_h^1$                                               | G-тип МП<br>( $2a, 2a, 2a$ )                   | 84                | —                                                                                                                                                                                                                                            | [3]            |
| NaMnCl <sub>3</sub>               | Тригональная $C_{3i}^2$                                          | $\mu \perp C$<br>(анизотропия типа ЛП)         | 6,5               | $\theta = 1$ К                                                                                                                                                                                                                               | [6]            |
| KMnCl <sub>3</sub>                | Тетрагональная * <sup>3</sup><br>$D_{4h}^{17} ([c]/[a]) = 1,005$ | —                                              | 100               | $\theta = -122$ К,<br>$\mu_0 H_E = 122$ Тл                                                                                                                                                                                                   | [6, 17]        |
| KMnCl <sub>3</sub>                | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                    | ГС, $k_0 \parallel [b]$ с периодом<br>3,17 [b] | 2,1               | $\mu_{Mn}(1,4 \text{ К}) = 3,78\mu_B$                                                                                                                                                                                                        | [67]           |
| RbMnCl <sub>3</sub>               | Гексагональная * <sup>4</sup><br>$D_{6h}^4$                      | $\mu \perp C$<br>(анизотропия типа ЛП)         | 95                | $\theta = -204$ К<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга $\Delta\sigma_{\parallel}(4,2 \text{ К}) = 4 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$ при<br>$\mu_0 H_{\perp} = 0,63$ Тл                               | [6, 17]        |
| CsMnCl <sub>3</sub>               | Тригональная $D_{3d}^5$                                          | $\mu \perp C$<br>(анизотропия типа ЛП)         | 67—70             | $\theta = -145$ К,<br>$\mu_0 H_E = 70,0$ Тл<br>$\mu_0 H_{c\perp} = 5,26$ Тл<br>$\mu_0 H_{A\parallel} = 0,74$ Тл                                                                                                                              | [6, 17]        |
| TlMnCl <sub>3</sub>               | Орторомбическая $C_{4v}^{10}$                                    | G-тип МП                                       | 118* <sup>5</sup> | $\theta = -259$ К,<br>$\mu_{Mn}(77 \text{ К}) = 4,7\mu_B$<br>$\mu_0 H_D = 0,16$ Тл при<br>$T_c = 108 \text{ К}^{*5}$ переход<br>АФ → СФ                                                                                                      | [3, 6]         |
| NH <sub>4</sub> MnCl <sub>3</sub> | Кубическая $O_h^1$ (орторомбические искажения при $T < T_N$ )    | G-тип МП<br>( $2a, 2a, 2a$ )                   | 105               | $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 5\mu_B$                                                                                                                                                                                                           | [3, 17]        |

\*<sup>1</sup>  $\mu_0 H_A = 2,48 \cdot 10^{-1}$  Тл, где  $H_A$  — поле анизотропии, полученное из измерения высокочастотной ветви АФМР [117].\*<sup>2</sup> См. приложение II в [8].\*<sup>3</sup> По данным [67] структура перовскита — пространственная группа  $D_{2h}^{16}$ .\*<sup>4</sup> Гексагональная структура при комнатной температуре. При  $T = 272$  К из оптических измерений обнаружен структурный переход  $D_{6h}^4 \rightarrow C_{2h}^2$  [118].\*<sup>5</sup>  $T_N$  и  $T_C$  указаны в соответствии с [3],  $T_N = T_C \approx 110$  К — по данным [6].

| Вещество                                   | Структура                       |                                                              | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                       | Литература |
|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                            | кристаллографическая            | магнитная                                                    |           |                                                                                                                                               |            |
| CsMnBr <sub>3</sub>                        | Гексагональная $D_{6h}^4$       | ГС, $k_0 \parallel C$<br>( $a\sqrt{3}$ , $a\sqrt{3}$ , $c$ ) | 8,3       | $\theta = -167$ К, $J/k = 9,9$ К<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$                                              | [6]        |
| TlMnI <sub>3</sub>                         | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$   | ГС, $k_0 \parallel b^{*1}$<br>$\mu \parallel (001)$          | 6,0       | $\theta = 10,6$ К, $p = 5,9$                                                                                                                  | [68]       |
| MnSO <sub>4</sub>                          | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$   | ГС, $k_0 \parallel [a]$ с периодом<br>3 нм                   | 11        | $\mu_{Mn^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 4,8\mu_B$                                                                                                     | [3, 17]    |
| MnSeO <sub>4</sub>                         | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$   | КС, $\mu \parallel (001)$                                    | 20        | $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 4,95\mu_B$                                                                                                         | [3]        |
| MnWO <sub>4</sub>                          | Моноклинная $C_{2h}^4$          | ( $4a$ , $2b$ , $2c$ )                                       | 14—16     | $\theta = -71$ К, $p = 5,83$                                                                                                                  | [3]        |
| MnUO <sub>4</sub>                          | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$   | $\mu \parallel [b]$                                          | 12        | $\theta = -8$ К, $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 4,88 \mu_B$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 0,2 \text{ см}^3/\text{моль}$                                  | [3, 17]    |
| BaMnF <sub>4</sub>                         | Орторомбическая $C_{2v}^{12*1}$ | НКС                                                          | 26        | $\mu(4,7 \text{ К}) = 4,8\mu_B$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$                                               | [6, 120]   |
| Mn(OH) <sub>2</sub>                        | Тригональная $D_{3d}^3$         | НКС<br>( $a\sqrt{3}$ , $a\sqrt{3}$ , $2c$ )                  | 12        | $\theta = -28$ К, $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 4,9\mu_B$                                                                                        | [3, 17]    |
| MnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>           | Кубическая $O_h^7$              | $\mu \parallel [100]$                                        | 6         | $\theta = -156$ К, $p = 5,13$<br>$\mu_{Mn^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,91\mu_B$                                                                   | [3]        |
| MnGa <sub>2</sub> O <sub>4</sub>           | Кубическая $O_h^7$              | $\mu \parallel [111]$                                        | 33        | $\theta = -154$ К, $p = 5,77$<br>$\mu_{Mn^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,6\mu_B$                                                                    | [3, 17]    |
| $\alpha$ -MnGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub> | Моноклинная $C_{2h}^6$          | —                                                            | 23,5      | $\theta = -50$ К                                                                                                                              | [69]       |
| $\beta$ -MnGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub>  | Орторомбическая $C_{2v}^9$      | —                                                            | 11        | $\theta = -28$ К                                                                                                                              | [69]       |
| K <sub>2</sub> MnF <sub>4</sub>            | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$    | $\mu \parallel C$<br>( $2a$ , $2a$ , $c$ )                   | 42—45     | $\mu_{Mn}(4,2 \text{ К}) = 4,54\mu_B$<br>$ J'/J  = 10^{-6}$ , $kT_N/J = 10,1$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$ | [3, 6]     |

\*1  $C_{2v}^{12}$  при  $T > 247$  К; при  $T = 247$  К — структурный фазовый переход в несонимметричную фазу, при котором происходит удвоение ячейки в плоскости  $bc$  и возникает несонимметричная модуляция структуры вдоль оси  $[a]$ .

| Вещество                | Структура                     |                                                                               | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                       | Литература   |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|                         | кристаллографическая          | магнитная                                                                     |           |                                                                                                                                                               |              |
| $Rb_2MnF_4$             | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$<br>(2a, 2a, c)                                              | 38        | $T_N / \theta = 0,44$ , $ J'/J  = 10^{-6}$ , $kT_N / J = 10,3$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$                                | [3, 6]       |
| $Rb_2MnCl_4$            | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$<br>(2a, 2a, c)                                              | 56        | $T_N / \theta = 0,39$<br>$\mu_{Mn}(4,2 K) = 4,4 \mu_B$<br>$J'/J = 10^{-6}$ , $kT_N / J = 9,2$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$ | [3, 6]       |
| $Cs_2MnCl_4$            | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$<br>(2a, 2a, c)                                              | 52        | $p = 5,9$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$                                                                                     | [3]          |
| $\alpha$ - $Cs_2MnCl_4$ | Орторомбическая               | —                                                                             | 0,93*1    | $\theta = -4 K$                                                                                                                                               | [17]         |
| $MnNb_2O_6$             | Орторомбическая $D_{2h}^{14}$ | $G_x$ -тип МП<br>(a, 2b, c)                                                   | 4,4       | $\theta = -18 K$                                                                                                                                              | [3, 17]      |
| $MnTa_2O_6$             | Орторомбическая $D_{2h}^{14}$ | $G_x G_z$ -тип МП<br>$\alpha(\mu, [a]) = 10^\circ$                            | —         | —                                                                                                                                                             | [3]          |
| $Pd_2MnAl$              | Кубическая $O_h^1$            | II тип МП                                                                     | 240       | $\mu_{Mn}(4,2 K) = 4,4 \mu_B$                                                                                                                                 | [3]          |
| $Pd_2MnIn$              | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>(2a, 2a, 2a)                                                     | 142       | $\theta = -50 K$ , $\mu_{Mn}(4,2 K) = 4,3 \mu_B$                                                                                                              | [3]          |
| $Mn(C_2H_5)_2$          | —                             | —                                                                             | 134       | $\theta = -492 K$ , $p = 7,18$                                                                                                                                | [17]         |
| $Mn_2SiO_4$             | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС*2<br>$\mu \parallel [a]$ при $T > T_n$ , $T_n = 13 K$<br>НКС при $T < T_n$ | 50        | $\theta = -163 K$ , $p = 5,87$<br>$\mu_{Mn^{2+}}(4,2 K) = 5 \mu_B$                                                                                            | [3, 17]      |
| $CaMn_2O_4$             | Орторомбическая $D_{2h}^{11}$ | КС, $\mu \parallel [a]$<br>(2a, b, c)                                         | 225       | $\theta = 294 K$ , $p = 4,72$<br>$\mu_{Mn}(4,2 K) = 3,6 \mu_B$                                                                                                | [3]          |
| $Mn_2GeO_4$             | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС                                                                           | 24        | $\theta = -162 K$ , $p = 5,85$                                                                                                                                | [3]          |
| $ZnMn_2O_4$             | Тетрагональная $D_{4h}^{19}$  | —                                                                             | 200       | —                                                                                                                                                             | [64, с. 325] |

\*1 Из измерений теплоемкости.

\*2  $\mu_{Mn I} \parallel [a]$ ,  $\mu_{Mn II}$  образуют скошенную АФ-структуру. при  $T < T_n = 20 K$ . КС при  $T_n < T < T_N = 47 K$  [116].

| Вещество                           | Структура                     |                                                                                                                                                            | $T_N$ , К                                   | Дополнительные сведения                                                                                                                                       | Литература |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                    | кристаллографическая          | магнитная                                                                                                                                                  |                                             |                                                                                                                                                               |            |
| $\text{BiMn}_2\text{O}_5$          | Орторомбическая $D_{2v}^7$    | НКС<br>( $2a$ , $b$ , $c$ )                                                                                                                                | 52                                          | $\theta = -236$ К                                                                                                                                             | [3]        |
| $\text{Mn}_2\text{GeS}_4$          | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС, $G_y$ -тип МП                                                                                                                                          | —                                           | $\mu_{\text{Mn}}$ (4,2 К) = $4,7 \mu_B$                                                                                                                       | [3]        |
| $\text{ThMn}_2\text{Si}_2$         | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | КС, $\mu \parallel C$                                                                                                                                      | 483                                         | $p = 2,4$ , $\mu_{\text{Mn}} = 1,75 \mu_B$                                                                                                                    | [3]        |
| $\text{ThMn}_2\text{Ge}_2$         | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | НКС                                                                                                                                                        | 400                                         | $p = 2,4$                                                                                                                                                     | [3]        |
| $\text{Cu}_3\text{Mn}_2\text{Al}$  | Кубическая $O_h^7$            | $\mu \parallel (001)$                                                                                                                                      | 873                                         | $\mu_{\text{Mn}}$ (4,2 К) = $4,5 \mu_B$                                                                                                                       | [3]        |
| $\text{Mn}_3\text{B}_4$            | Орторомбическая $D_{2h}^{25}$ | КС при $226 \text{ К} < T < T_N$<br>ГС при $110 \text{ К} < T < 226 \text{ К}$<br>$k_0 \parallel [b]$<br>КС при $T < 110 \text{ К}$<br>$\mu \parallel [c]$ | 392                                         | $\theta = -543$ К,<br>$\mu_{\text{Mn I}}$ (4,2 К) = $2,92 \mu_B$<br>$\mu_{\text{Mn II}}$ (4,2 К) = $0,44 \mu_B$                                               | [3]        |
| $\text{Mn}_3\text{GaC}$            | Кубическая $O_h^1$            | КС, $\mu \parallel [111]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                                                                                                        | 150—164<br>( $\Phi \rightarrow \text{АФ}$ ) | $\mu_{\text{Mn}}$ (4,2 К) = $1,8 \mu_B$<br>Ферромагнетик при $T_N < T < T_c = 248$ К                                                                          | [3, 17]    |
| $\text{Mn}_3\text{NiN}$            | Кубическая $O_h^1$            | НКС<br>(изменения структуры при $T = 180$ К)                                                                                                               | —                                           | $\mu_{\text{Mn}}$ (77 К) = $0,98 \mu_B$                                                                                                                       | [3]        |
| $\text{Mn}_3\text{ZnN}$            | Кубическая $O_h^1$            | НКС<br>(изменение структуры при $T = 140$ К)                                                                                                               | $T_N = 183$ К                               | $\mu_{\text{Mn I}} = 1,21 \mu_B$ при<br>$140 \text{ К} < T < T_N$<br>$\mu_{\text{Mn I}}$ (4,2 К) = $0,61 \mu_B$<br>$\mu_{\text{Mn II}}$ (4,2 К) = $1,0 \mu_B$ | [3, 17]    |
| $\text{Mn}_3\text{GaN}$            | Кубическая $O_h^1$            | НКС                                                                                                                                                        | 298                                         | $\mu_{\text{Mn}}$ (4,2 К) = $2,34 \mu_B$                                                                                                                      | [3]        |
| $\text{CsMn}_3\text{Cl}_5$         | Тетрагональная                | —                                                                                                                                                          | 0,59*1                                      | $\theta = -0,9$ К                                                                                                                                             | [17]       |
| $\text{Mn}_3\text{B}_2\text{O}_6$  | Орторомбическая $D_{2h}^{12}$ | —                                                                                                                                                          | 35                                          | $\theta = -185$ К, $p = 6,18$                                                                                                                                 | [3]        |
| $\text{Nb}_2\text{Mn}_4\text{O}_9$ | Тригональная $D_{3d}^4$       | КС<br>$\mu \parallel C$                                                                                                                                    | 110*2<br>125                                | $\theta = -250$ К,<br>$\mu_{\text{Mn}^{2+}}$ (4,2 К) = $5 \mu_B$<br>Магнитоэлектрик при<br>$140 \text{ К} < T < T_N$                                          | [3, 17]    |
| $\text{Ta}_2\text{Mn}_4\text{O}_9$ | Тригональная $D_{3d}^4$       | —                                                                                                                                                          | 103*2                                       | Магнитоэлектрик                                                                                                                                               | [17]       |
| $\text{Dy}_2\text{Mn}_4\text{O}_9$ | Орторомбическая $D_{2h}^9$    | —                                                                                                                                                          | 8                                           | —                                                                                                                                                             | [17]       |

\*1 Из измерений теплоемкости.

\*2 Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

| Вещество                                                                      | Структура                     |                                               | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                | Литература |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                               | кристаллографическая          | магнитная                                     |           |                                                                                                                                                                                                                        |            |
| $\text{LiMnPO}_4$                                                             | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС<br>$\mu \parallel [100]$                   | 35        | $\theta = -80$ К, $p = 5,2$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 33 \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль                                                                                                                            | [3, 17]    |
| $\text{CuMnSnS}_4$                                                            | Тетрагональная $D_{2d}^{11}$  | КС<br>$\mu \parallel (101)$<br>( $2a, a, c$ ) | —         | $\mu_{\text{Mn}^{2+}}(290 \text{ К}) = 4,3\mu_B$                                                                                                                                                                       | [3]        |
| $\text{Ba}_2\text{MnUO}_6$                                                    | Кубическая $O_h^5$            | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                 | 12,8      | $\mu_{\text{Mn}} = 2,25\mu_B$                                                                                                                                                                                          | [3]        |
| $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$                                     | Моноклинная $C_{2h}^5$        | КС<br>$\alpha(\mu, [c]) = 7^\circ$            | 1,62      | $\theta = -1,79$ К, $\mu_0 H_{c\parallel}(1,2 \text{ К}) =$<br>$= 0,25 \div 0,5$ Тл<br>$^{54}\chi_{\text{Mn}} = 500,4$ МГц <sup>*1</sup>                                                                               | [17]       |
| $\text{MnBr}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$                                     | Моноклинная $C_{2h}^5$        | КС<br>$\mu \parallel [c]$                     | 2,136     | $\mu_0 H_{c\parallel}(1,2 \text{ К}) =$<br>$= 0,75 \div 1,0$ Тл                                                                                                                                                        | [17]       |
| $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$                              | Кубическая $O_h^{10}$         | НКС <sup>*2</sup>                             | 6,65      | $\theta = -28$ К, $p = 5,89$<br>$c/\lambda(0) = 39$ ГГц <sup>*3</sup>                                                                                                                                                  | [121, 122] |
| $\alpha\text{-RbMnCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$<br>( $\alpha\text{-RMC}$ ) | —                             | КС                                            | 4,56      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J/k  =$<br>$= 3,0$ К, $ J'/J  = 7 \cdot 10^{-3}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel} = 1,31$ Тл<br>$\mu_0 H_E = 20,0$ Тл<br>$\mu_0 H_A = 4,27 \cdot 10^{-2}$ Тл  | [71]       |
| $\text{CsMnCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$<br>(СМС)                          | Орторомбическая $D_{2h}^8$    | КС                                            | 4,89      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J/k  =$<br>$= 3,2$ К, $ J'/J  = 8 \cdot 10^{-3}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel} = 1,64$ Тл<br>$\mu_0 H_E = 23,8$ Тл<br>$\mu_0 H_A = 5,65 \cdot 10^{-2}$ Тл  | [71]       |
| $\text{CsMnBr}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$<br>(СМБ)                          | Орторомбическая               | КС                                            | 5,75      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J/k  =$<br>$= 3,0$ К, $ J'/J  = 11 \cdot 10^{-3}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel} = 2,05$ Тл<br>$\mu_0 H_E = 22,3$ Тл<br>$\mu_0 H_A = 9,41 \cdot 10^{-2}$ Тл | [71]       |
| $\text{MnSiF}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                                    | Тригональная $C_{3i}^2$       | —                                             | 0,1       | —                                                                                                                                                                                                                      | [17]       |

<sup>\*1</sup> Наиболее сильная линия ( $M = -3 \rightarrow M = -2$ ) в квадрупольно-расщепленном спектре ЯМР на ориентированных ядрах Мп [70].

<sup>\*2</sup> Магнитные моменты марганца лежат в плоскости (111) и направлены вдоль или против осей [211], [121] и [112].

<sup>\*3</sup> В [122] изучено поведение трех ветвей магнитного резонанса в  $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ .

| Вещество                                                                          | Структура                                                                                                  |                                                                                        | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                       | Литература |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                   | кристаллографическая                                                                                       | магнитная                                                                              |           |                                                                                                                                                                                                               |            |
| $\text{Cs}_2\text{MnCl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                              | Триклинная                                                                                                 | —                                                                                      | 1,80*1    | —                                                                                                                                                                                                             | [17]       |
| $(\text{CH}_3)_4\text{N} \cdot \text{MnCl}_3$<br>(ТММС)                           | Гексагональная $D_{6h}^9$<br>(моноклинные искажения при $T < 171$ К)<br>структурный переход при $T = 45$ К | КС                                                                                     | 0,84      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J/k  = 6,7$ К, $ J'/J  = 10^{-4}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel} = 1,14$ Тл<br>$\mu_0 H_E = 49,9$ Тл<br>$\mu_0 H_A = 1,30 \cdot 10^{-2}$ Тл        | [6, 71]    |
| $(\text{CH}_3\text{NH}_3) \cdot \text{MnCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$<br>(ММС) | Моноклинная $C_{2h}^5$                                                                                     | —                                                                                      | 4,12      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J/k  = 3,01$ К, $ J'/J  = 6 \cdot 10^{-3}$                                                                                                   | [72]       |
| $(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2 \cdot \text{MnCl}_3$<br>(ДММС)                        | —                                                                                                          | КС                                                                                     | 3,60      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J/k  = 6,5$ К, $ J'/J  = 10^{-3}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel} = 1,83$ Тл<br>$\mu_0 H_E = 48,4$ Тл<br>$\mu_0 H_A = 3,46 \cdot 10^{-2}$ Тл        | [71]       |
| $(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}) \cdot \text{MnCl}_3$<br>(РМСА)                   | —                                                                                                          | КС                                                                                     | 2,32      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J/k  = 6,5$ К, $ J'/J  = 4 \cdot 10^{-4}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel} = 1,0$ Тл<br>$\mu_0 H_E = 48,4$ Тл<br>$\mu_0 H_A = 1,03 \cdot 10^{-2}$ Тл | [71]       |
| $\text{Mn}(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$             | Моноклинная $C_{2h}^5$                                                                                     | —                                                                                      | 3,2       | $\theta = -5,2$ К, $\sigma_M(0 \text{ К}) = 2,79 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$                                                                                                                      | [3, 17]    |
| $\text{Mn}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                              | Моноклинная $C_{2h}^5$                                                                                     | $\mu \parallel (100)$                                                                  | 3,7*2     | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$ ; $ J/k  = 0,35$                                                                                                                                      | [17, 73]   |
| $\text{Mn}(\text{DCOO})_2 \cdot 2\text{D}_2\text{O}$                              | Моноклинная $C_{2h}^5$                                                                                     | $\sigma \parallel (101)$ при $T > T_N = 1,7$ К<br>$\sigma \parallel [b]$ при $T < T_N$ | 3,7       | $\mu_{\text{Mn}^{2+}}(2,5 \text{ К}) = \mu_{\text{Mn}^{2+}}(1,5 \text{ К}) = 5,06 \mu_B$                                                                                                                      | [3]        |
| $\text{Mn}(\text{NH}_4)_2 \cdot (\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$        | Моноклинная                                                                                                | —                                                                                      | 0,14      | $\sigma_M(0 \text{ К}) = 7,82 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$                                                                                                                                         | [17]       |

\*1 Из измерений теплоемкости.

\*2 При этой температуре упорядочивается только часть магнитных моментов. Остальные моменты обуславливают парамагнитные свойства. При  $T = 0,23$  К наблюдаются аномалии Шоттки в поведении теплоемкости.

| Вещество          | Структура                                                        |                                                                        | $T_N$ , К                                 | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                             | Литература |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                   | кристаллографическая                                             | магнитная                                                              |                                           |                                                                                                                                                                                                     |            |
| FeO               | Кубическая $O_h^5$<br>(ромбоэдрические искажения при $T < T_N$ ) | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>(2a, 2a, 2a)                     | 198                                       | $\theta = -570$ К, $p = 4,6$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi =$<br>$= 8 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_{Fe^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,32\mu_B$                                                     | [3, 17]    |
| FeSi              | Кубическая $T_4$                                                 | —                                                                      | 523                                       | $\theta = -149$ К, $p = 2,55$                                                                                                                                                                       | [3, 17]    |
| FeP               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                    | ГС, $k_0 \parallel [c]$<br>$\mu \perp [c]$<br>(a, b, 5c)               | 125                                       | $\theta = -50$ К,<br>$\mu_{Fe \text{ I}}(4,2 \text{ К}) = 0,46\mu_B$<br>$\mu_{Fe \text{ II}}(4,2 \text{ К}) = 0,37\mu_B$                                                                            | [3, 17]    |
| FeS               | Гексагональная $D_{3h}^4$                                        | $\mu \parallel C$ при $T < T_N = 390$ К<br>$\mu \perp C$ при $T > T_N$ | 593—600                                   | $\theta = -917$ К,<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 2,2 \times$<br>$\times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль                                                                                                     | [3, 17]    |
| FeCo              | Кубическая $O_h^1$                                               | —                                                                      | 1253                                      | $\mu_{Fe} = 2,9\mu_B$<br>$\mu_{Co} = 1,9\mu_B$                                                                                                                                                      | [3]        |
| FeGe              | Гексагональная $D_{6h}^1$                                        | КС, $\mu \parallel C$<br>(a, a, 2c)                                    | 400—412                                   | $p = 3,19\mu_{Fe}(4,2 \text{ К}) =$<br>$= 1,67\mu_B$                                                                                                                                                | [3]        |
| FeAs              | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                    | ГС, $k_0 \parallel [c]$                                                | 77                                        | $p = 3,1$ , $\mu_{Fe}(4,2 \text{ К}) =$<br>$= 0,5\mu_B$                                                                                                                                             | [3]        |
| FeSe              | Гексагональная $D_{6h}^4$                                        | —                                                                      | 847                                       | Ферромагнетик при<br>$T < 423$ К                                                                                                                                                                    | [17]       |
| FeSn              | Гексагональная $D_{6h}^1$                                        | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>$\mu \parallel (001)$<br>(a, a, 2c)   | 365—373                                   | $\theta = -158$ К, $p = 4,5$<br>$\mu_{Fe}(4,2 \text{ К}) = 1,55\mu_B$                                                                                                                               | [3]        |
| FeRh              | Кубическая $O_h^1$                                               | G-тип МП<br>(2a, 2a, 2a)                                               | 328<br>( $\Phi \rightarrow \Lambda\Phi$ ) | Ферромагнетик при<br>$T_N < T < T_C = 668$ К<br>$\Delta\sigma_{уд} = (328 \text{ К}) = 117 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$<br>$\rho(0 \text{ К}) = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ | [3, 17]    |
| FeF <sub>2</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                     | $\mu \parallel C$                                                      | 78                                        | $\theta = -117$ К, $\mu_{Fe^{2+}}(23 \text{ К}) =$<br>$= 4\mu_B$<br>$\lambda(0) = 189$ мкм                                                                                                          | [3, 17]    |
| FeCl <sub>2</sub> | Тригональная $D_{3d}^5$                                          | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>$\mu \parallel C$<br>(2a, 2a, 2a)     | 23                                        | $\theta = 48$ К, $p = 5,26$<br>$\mu_{Fe^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 4,2\mu_B$<br>Метамагнетик: $H_A > H_E$<br>$\mu_0 H_{c \parallel} = 1,05$ Тл                                                          | [3, 6, 17] |
| FeBr <sub>2</sub> | Тригональная $D_{3d}^3$                                          | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>$\mu \parallel c$<br>(a, a, 2c)       | 11                                        | $\theta = 6$ К, $\mu_{Fe}(4,2 \text{ К}) =$<br>$= 4,2\mu_B$<br>Метамагнетик: $H_A > H_E$<br>$\mu_0 H_{c \parallel} = 3,15$ Тл                                                                       | [3, 6, 17] |

| Вещество                       | Структура                     |                                                                           | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Литература |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                | кристаллографическая          | магнитная                                                                 |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |            |
| $\text{FeI}_2$                 | Тригональная $D_{3d}^3$       | $\mu \parallel C$                                                         | 10        | $\theta = -23$ К<br>Метамagnetик: $H_A > H_E$<br>Поведение в магнитном поле описывается моделью с 8—12 подрешетками (4 фазовых перехода по магнитному полю)                                                                                                                                                                                                                | [3, 6, 17] |
| $\text{FeP}_2$                 | Орторомбическая $D_{2h}^{12}$ | —                                                                         | 250*1     | $\theta = -17$ К, $\chi_M(T_N)/4\pi = 1,18 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль                                                                                                                                                                                                                                                                                            | [17]       |
| $\text{FeGe}_2$                | Тетрагональная $D_{4h}^{18}$  | $\mu \parallel (001)$                                                     | 270—315   | $\theta = -510$ К, $\mu_{\text{Fe}}(4,2 \text{ К}) \approx 1\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | [3, 17]    |
| $\text{FeSn}_2$                | Тетрагональная $D_{4h}^{18}$  | $(2a, 2a, c)$                                                             | 377—384   | $\theta = -230$ К, $p = 3,36$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 1,95 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль                                                                                                                                                                                                                                                                             | [3, 17]    |
| $\text{FeTe}_2$                | —                             | —                                                                         | 85        | $\theta = -320$ К, $p = 0,194$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | [17]       |
| $\text{FeF}_3$                 | Тригональная $D_{3d}^6$       | КС, $\mu \parallel (111)$                                                 | 362—365   | $\mu_{\text{Fe}}(4,2 \text{ К}) = 5\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | [3, 17]    |
| $\text{FeCl}_3$                | Тригональная $C_{3i}^2$       | ГС                                                                        | 10        | $\theta = -115$ К, $p = 5,73$<br>$\mu_{\text{Fe}^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 4,3\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                          | [3, 17]    |
| $\text{FePt}_3$                | Кубическая $O_h^1$            | С-тип МП<br>( $2a, 2a, a$ )                                               | 120       | $\mu_{\text{Fe}} = 3,3\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | [3, 17]    |
| $\text{Fe}_2\text{As}$         | Тетрагональная $D_{4h}^7$     | $\mu \perp C$<br>( $a, a, 2c$ )                                           | 368       | $\theta = -90$ К, $p = 4,66$<br>$\mu_{\text{FeI}}(290 \text{ К}) = 1,28\mu_B$<br>$\mu_{\text{FeII}}(290 \text{ К}) = 2,05\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                            | [3]        |
| $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ | Тригональная $D_{3d}^6$       | $\mu \parallel C$ при $T < T_M^{*2}$<br>$\mu \perp C$ при $T_M < T < T_N$ | 950—959   | $\mu_{\text{Fe}}(4,2 \text{ К}) = 4,9\mu_B$<br>$^{57}\nu_{\text{Fe}}(290 \text{ К}) = 71,2 \text{ МГц}^{*3}$<br>$c_M(300 \text{ К}) = 3 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$<br>$\mu_0 H_E = 900 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_D = 2,2 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_{c\parallel}(77 \text{ К}) = 6,8 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_{c\perp}(77 \text{ К}) = 16 \text{ Тл}$ | [3, 17]    |
| $\text{FeOF}$                  | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$  | $\mu \parallel C$                                                         | 315       | $\mu_{\text{Fe}^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 4,8\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | [3]        |

\*1 Нет уверенности, что переход  $\Pi \rightarrow \text{АФ}$ .\*2 При  $T = T_M = 262$  К переход  $\text{СФ} \rightarrow \text{АФ}$  (см. сноску на с. 651).

\*3 См. приложение II в [8].



| Вещество                         | Структура                     |                                                                                                                       | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                               | Литература     |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|                                  | кристаллографическая          | магнитная                                                                                                             |           |                                                                                                                                       |                |
| FeOCl                            | Орторомбическая $D_{2h}^{13}$ | —                                                                                                                     | 92,3      | —                                                                                                                                     | [17]           |
| LiFeO <sub>2</sub>               | Тетрагональная $D_{4h}^{19}$  | КС<br>$\mu \parallel C$ при $T > T_N = 90$ К<br>$\mu \parallel (111)$ при $T < T_N$                                   | 315       | $\mu_{Fe^{2+}}(77\text{ К}) = 4,5 \mu_B$<br>$\mu_{Fe^{3+}}(4,2\text{ К}) = 2,5 \mu_B$<br>$\sigma(0\text{ К}) \neq 0$                  | [3, 17]        |
| $\beta$ -FeNaO <sub>2</sub>      | Орторомбическая $C_{2v}^9$    | $\sigma \parallel [b]$<br>$\mu \parallel [c]$                                                                         | 723       | $\mu_{Fe}(290\text{ К}) = 4,2 \mu_B$                                                                                                  | [3, 17]        |
| CuFeS <sub>2</sub>               | Тетрагональная $D_{2d}^{12}$  | $\sigma \perp C$                                                                                                      | 815—823   | $\mu_{Fe} = 3,85 \mu_B$<br>$E_g = 2,5$ эВ                                                                                             | [3, 17]        |
| FeBO <sub>3</sub>                | Тригональная $D_{3d}^6$       | НКС<br>$\mu \parallel (111)$<br>$\sigma \perp C$                                                                      | 348       | $\mu_{Fe}(77\text{ К}) = 4,7 \mu_B$<br>$\mu_0 H_D(293\text{ К}) = 6,2$ Тл<br>$^{57}\gamma_{Fe}(77\text{ К}) = 76,5$ МГц <sup>*1</sup> | [3, 17]        |
| FeCO <sub>3</sub>                | Тригональная $D_{3d}^6$       | КС<br>$\mu \parallel C$                                                                                               | 38        | $\theta = -14$ К, $\mu_0 H_c \parallel = 15,3$ Тл<br>Магнитные свойства соответствуют модели Изинга                                   | [2, 3, 40, 74] |
| FeTiO <sub>3</sub>               | Тригональная $C_{3i}^2$       | $\mu \perp [111]$<br>( $2a, 2a, 2a$ )                                                                                 | 68        | $p = 5,23$                                                                                                                            | [3, 17]        |
| FeVO <sub>3</sub>                | Тригональная $D_{3d}^6$       | —                                                                                                                     | —         | —                                                                                                                                     | [17]           |
| YFeO <sub>3</sub>                | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\sigma \parallel [001]$                                                                                              | 640—650   | $\sigma_M(4,2\text{ К}) = 0,30$ А·м <sup>2</sup> /моль<br>$\mu_0 H_c(4,2\text{ К}) = 7,25$ Тл <sup>*2</sup>                           | [3, 17]        |
| LaFeO <sub>3</sub> <sup>*3</sup> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\sigma \parallel [001]$<br>( $2a, 2b, 2c$ )                                                                          | 738—750   | $\theta = -480$ К,<br>$\sigma_M^{*4} = 0,24$ А·м <sup>2</sup> /моль                                                                   | [3, 17]        |
| CeFeO <sub>3</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\sigma \parallel [001]$ при<br>$T > T_N$ , $T_N = 230$ К                                                             | 719       | —                                                                                                                                     | [17]           |
| PrFeO <sub>3</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\sigma \parallel [001]$                                                                                              | 707—711   | $p = 3,6$                                                                                                                             | [3, 17]        |
| NdFeO <sub>3</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\mu \parallel [a]$ при<br>$T > T_{N1} = 160$ К<br>$\mu \parallel [c]$ при<br>$T < T_{N2} = 70$ К<br>( $2a, 2b, 2c$ ) | 687—689   | $p = 3,6$ ,<br>$\mu_{Fe^{3+}}(43\text{ К}) = 4,57 \mu_B$                                                                              | [3, 17]        |

\*1 См. приложение II в [8].

\*2 При  $H = H_c$  происходит фазовый переход второго рода, заключающийся в изменении магнитной симметрии [75].\*3 Обзор магнитных свойств ортоферритов (RFeO<sub>3</sub>, где R — редкоземельный ион) дан в [76], магнитные ориентационные переходы в ортоферритах рассмотрены в [11].\*4 Значения  $\sigma$  в RFeO<sub>3</sub> даны для  $T < T_N$  (Fe), но  $T > T_N$  (R).

| Вещество           | Структура                                                            |                                                                                                                                    | $T_N$ , К                          | Дополнительные сведения                                                                                                                               | Литература |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                    | кристаллографическая                                                 | магнитная                                                                                                                          |                                    |                                                                                                                                                       |            |
| SmFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$ ,<br>$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ ,<br>$T_N = 470 \div 490$ К                     | 672—674                            | $\sigma_M = 0,21$ А·м <sup>2</sup> /моль                                                                                                              | [3, 17]    |
| EuFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [001]$                                                                                                           | 666                                | $\sigma_M = 0,20$ А·м <sup>2</sup> /моль                                                                                                              | [17]       |
| GdFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | A <sub>x</sub> -тип МП при<br>$T > T_N = 80$ К                                                                                     | 657—670<br>(Fe)<br>2,6 (Gd)        | $\theta = -4,3$ К, $p = 8$<br>$\sigma_M = 0,26$ А·м <sup>2</sup> /моль                                                                                | [3, 17]    |
| TbFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [001]$ при<br>$T > T_N$ , $T_N = 8,4$ К<br>(при $T = 3,1$ К измене-<br>ние магнитной структуры<br>подрешеток Tb) | 650—681<br>(Fe)<br>8,3 (Tb)        | $p = 9,7$<br>$\mu_{Fe} (97 \text{ К}) = 4,8 \mu_B$<br>$\mu_{Tb^{3+}} (1,5 \text{ К}) = 8,6 \mu_B$<br>$\sigma_M = 0,35$ А·м <sup>2</sup> /моль         | [3, 17]    |
| DyFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ ,<br>$\sigma = 0$ при $T < T_N$ ,<br>$T_N = 30 \div 40$ К <sup>*1</sup>                     | 645—648<br>(Fe)<br>3,7 (Dy)        | $\sigma_M = 0,33$ А·м <sup>2</sup> /моль<br>Переориентация магнитной<br>структуры при $T = T_N$<br>происходит скачком                                 | [3, 17]    |
| HoFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$ ,<br>$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ ,<br>$T_N = 51 \div 63$ К                       | 639—647<br>(Fe)<br>6,5 (Ho)        | $p = 10,5$<br>$\mu_{Fe^{2+}} (43 \text{ К}) = 4,6 \mu_B$<br>$\mu_{Ho^{3+}} (1,25 \text{ К}) = 7,25 \mu_B$<br>$\sigma_M = 0,24$ А·м <sup>2</sup> /моль | [3, 17]    |
| ErFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$ ,<br>$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ ,<br>$T_N = 80 \div 100$ К                      | 636—643<br>(Fe)<br>3,9—4,5<br>(Er) | $p = 9,5$<br>$\mu_{Fe^{2+}} (43 \text{ К}) = 4,6 \mu_B$<br>$\mu_{Er^{3+}} (1,25 \text{ К}) = 5,8 \mu_B$<br>$\sigma_M = 0,23$ А·м <sup>2</sup> /моль   | [3, 17]    |
| TmFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [100]$ при $T < T_N$ ,<br>$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ ,<br>$T_N = 80 \div 92$ К                       | 630—632                            | $p = 7,3$<br>$\sigma_M = 0,32$ А·м <sup>2</sup> /моль                                                                                                 | [3, 17]    |
| YbFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_N$ ,<br>$T_N = 6 \div 8$ К                                                                     | 627—634                            | $p = 4,5$<br>$\sigma_M = 0,35$ А·м <sup>2</sup> /моль                                                                                                 | [3, 17]    |
| LuFeO <sub>3</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                        | $\mu \parallel [a]$                                                                                                                | 622—625                            | $\sigma_M = 0,28$ А·м <sup>2</sup> /моль                                                                                                              | [3, 17]    |
| BiFeO <sub>3</sub> | Тригональная<br>$D_{3d}^6$ , $C_{3v}^{6*2}$                          | —                                                                                                                                  | 643                                | —                                                                                                                                                     | [17]       |
| KFeF <sub>3</sub>  | Кубическая $O_h^1$ (три-<br>гональные искаже-<br>ния при $T < T_N$ ) | G-тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>(2a, 2a, 2a)                                                                                  | 113                                | $\mu_{Fe^{2+}} (4,2 \text{ К}) = 4,42 \mu_B$                                                                                                          | [3, 17]    |

\*1 При низких температурах ( $T < T_N$ ) в DyFeO<sub>3</sub> наблюдается ряд фазовых переходов, индуцируемых магнитным полем. Магнитные свойства DyFeO<sub>3</sub> соответствуют модели Изинга.

\*2 Предполагаемые структуры.

| Вещество            | Структура                           |                                                                                                      | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                    | Литература |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                     | кристаллографическая                | магнитная                                                                                            |           |                                                                                                                                            |            |
| RbFeF <sub>3</sub>  | Кубическая <sup>*1</sup><br>$O_h^1$ | G-тип МП<br>$\mu \parallel C$<br>(2a, 2a, 2a)                                                        | 102—105   | $\theta = -88$ К, $p = 5,82$<br>$\mu_{Fe^{2+}} = 4,6\mu_B$                                                                                 | [3, 17]    |
| RbFeCl <sub>3</sub> | Гексагональная $D_{6h}^4$           | HKC                                                                                                  | 2,5       | При $T = 2,35$ К и $T = 1,95$ К магнитные фазовые переходы с изменением структуры                                                          | [77]       |
| CsFeF <sub>3</sub>  | Гексагональная $D_{6h}^4$           | $\alpha(\mu, C) = 75^\circ$                                                                          | 60—62     | $\mu_{Fe^{2+}}(77\text{ К}) = 4,4\mu_B$                                                                                                    | [3]        |
| KFeCl <sub>3</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$       | KC, $\mu \parallel C$<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                                               | 15        | $\mu_{Fe^{2+}}(77\text{ К}) = 4,1\mu_B$                                                                                                    | [3]        |
| TlFeI <sub>3</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$       | $\mu \parallel [b]$<br>ФВ в (100)<br>АФВ между (100)                                                 | 21,5      | $\theta = -44$ К, $p = 6,7$                                                                                                                | [68]       |
| FePO <sub>4</sub>   | Тригональная $D_{3d}^4$             | $\mu \parallel C$                                                                                    | 25        | $\theta = -60$ К                                                                                                                           | [17]       |
| FeSO <sub>4</sub>   | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$       | KC, $\mu \parallel [b]$<br>ФВ в (010)<br>АФВ между (010)                                             | 21—23     | $\theta = -30,5$ К, $p = 5,2$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 78,5 \cdot 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_{Fe^{2+}}(4,2\text{ К}) = 4,1\mu_B$ | [3, 17]    |
| FeNbO <sub>4</sub>  | Моноклинная $C_{2h}^4$              | $\mu \parallel (010)$<br>ФВ в (100)<br>АФВ между (100)<br>(2a, b, c)                                 | —         | —                                                                                                                                          | [3]        |
| FeTaO <sub>4</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$        | $\mu \parallel C$                                                                                    | 180       | $\theta = -456$ К, $p = 5,3$<br>Ферримагнетик при $T < 30$ К<br>$\mu_{Fe^{2+}}(77\text{ К}) = 2,96\mu_B$                                   | [3]        |
| FeWO <sub>4</sub>   | Моноклинная $C_{2h}^4$              | $\mu \parallel (010)$ , $\alpha(\mu, [a]) = 29^\circ$<br>ФВ в (100)<br>АФВ между (100)<br>(2a, b, c) | 76        | $\theta = 27$ К, $p = 5,41$<br>$\mu_{Fe}(4,2\text{ К}) = 2,19\mu_B$                                                                        | [3]        |
| FeUO <sub>4</sub>   | Орторомбическая $D_{2h}^4$          | KC <sup>*2</sup> , $\mu \parallel [b]$                                                               | 55        | $p = 5,42$<br>При $T < 42$ К ферромагнетик со слабым антиферромагнетизмом, $\rho = 3,2 \cdot 10^2$ Ом·см                                   | [3, 17]    |
| KFeF <sub>4</sub>   | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$       | $\mu \parallel [c]$                                                                                  | 137       | —                                                                                                                                          | [3]        |

<sup>\*1</sup> При  $T > T_N$  — кубическая структура; при  $87\text{ К} < T < T_N$  — тетрагональные искажения; при  $T = 40 \div 87$  К — орторомбическая структура и при  $T < 40$  К — моноклинная.

<sup>\*2</sup> Для АФ-структуры.

| Вещество                          | Структура                                                       |                                                                                                 | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                       | Литература |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                   | кристаллографическая                                            | магнитная                                                                                       |           |                                                                                               |            |
| BaFeF <sub>4</sub>                | Орторомбическая $C_{2v}^{12}$                                   | $\mu \parallel [c]$<br>( $a$ , $2b$ , $2c$ )                                                    | 54        | Магнитные свойства описываются двумерной моделью<br>$\mu_{Fe^{2+}}(4,2\text{ К}) = 4,1 \mu_B$ | [3, 17]    |
| RbFeF <sub>4</sub>                | Орторомбическая $C_{2h}^5$                                      | $\mu \parallel [b]$<br>ФВ в (111)<br>АФВ между (111)<br>( $a$ , $2b$ , $c$ )                    | —         | —                                                                                             | [3]        |
| FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>  | Кубическая $O_h^7$                                              | —                                                                                               | 8         | $\theta = -76\text{ К}$ , $p = 4,14$                                                          | [3]        |
| FeSb <sub>2</sub> O <sub>4</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{13}$                                    | НКС<br>$\mu \perp [a]$                                                                          | 46        | $\mu_{Fe^{2+}}(4,2\text{ К}) = 3,8 \mu_B$                                                     | [3, 17]    |
| Rb <sub>2</sub> FeF <sub>4</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                                    | $\mu \parallel [b]$<br>( $2a$ , $2a$ , $c$ )                                                    | 50—56     | $ T_N / \theta  = 0,54$<br>Магнитные свойства соответствуют XY-модели<br>$H_A / H_E = 0,1$    | [3, 6]     |
| FeCr <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> | Моноклинная $C_{2h}^3$                                          | $\alpha(\mu, [10\bar{1}]) = 55^\circ$<br>ФВ в (101)<br>АФВ между (101)<br>( $2a$ , $b$ , $2c$ ) | 4,2       | —                                                                                             | [3]        |
| FeNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{14}$                                   | КС<br>$\mu \parallel [a]$<br>( $a$ , $2b$ , $c$ )                                               | < 25      | $\mu_{Fe}(4,2\text{ К}) = 3,87 \mu_B$                                                         | [3]        |
| FeTa <sub>2</sub> O <sub>6</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                    | $\mu \parallel (001)$<br>$\alpha(\mu, [a]) = 45^\circ$<br>( $2a$ , $2b$ , $2c$ )                | 14        | $\mu_{Fe} = 4,08 \mu_B$                                                                       | [3]        |
| Ba <sub>2</sub> FeF <sub>6</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                                    | $\mu \parallel C$<br>( $2a$ , $2a$ , $c$ )                                                      | 48        | Магнитные свойства соответствуют 2d-модели<br>$\mu_{Fe^{2+}}(4,2\text{ К}) = 3,46 \mu_B$      | [78]       |
| FeNb <sub>3</sub> S <sub>6</sub>  | Гексагональная $D_6^6$                                          | $\mu \parallel C$                                                                               | —         | $\theta = -100\text{ К}$ , $p = 4,93$<br>$\mu_{Fe}(4,2\text{ К}) = 3,8 \mu_B$                 | [3]        |
| Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | $\mu \parallel [b]^*$<br>КС при $T > T_N = 20\text{ К}$<br>НКС при $T < T_N$                    | 65        | $\theta = -150\text{ К}$ , $p = 6,03$<br>$\mu_{Fe I} = \mu_{Fe II}(4,2\text{ К}) = 4 \mu_B$   | [3, 17]    |
| Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>  | Кубическая $O_h^7$<br>(тетрагональные искажения при $T < T_N$ ) | —                                                                                               | 140—142   | $\sigma \neq 0$<br>$\mu_{Fe}(4,2\text{ К}) = 4,2 \mu_B$                                       | [3]        |

\*<sup>1</sup>  $\mu_{Fe I} \parallel [b]$ ,  $\mu_{Fe II}$  образуют скошенную АФ-структуру при  $T < T_N$  [116].

| Вещество                           | Структура                     |                                                         | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                               | Литература |
|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                    | кристаллографическая          | магнитная                                               |           |                                                                                                                       |            |
| $\text{CaFe}_2\text{O}_4$          | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС, $\mu \parallel [c]$                                 | 180—200   | $\theta = -580 \text{ К}$ , $p = 5,4$<br>$\mu_{\text{Fe}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 4,0\mu_B$                             | [3]        |
| $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$          | Кубическая $O_h^7$            | НКС<br>( $a$ , $a$ , $2a$ )                             | 9—17      | $\theta = -21 \text{ К}$<br>$\mu_{\text{Fe}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 4,0\mu_B$                                          | [3, 17]    |
| $\text{BaFe}_2\text{O}_4$          | Орторомбическая $C_{3v}^9$    | $G_z$ -тип МП                                           | 880       | $\mu_{\text{Fe}} = 4.58\mu_B$                                                                                         | [3]        |
| $\text{Fe}_2\text{Mn}_4\text{P}$   | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>$\mu \parallel (101)$<br>( $a$ , $b$ , $2c$ )    | 340       | $\theta = -81 \text{ К}$                                                                                              | [3]        |
| $\text{Fe}_2\text{GeS}_4$          | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>(изменение структуры при<br>$T = 69 \text{ К}$ ) | 108       | $\mu_{\text{Fe I}}(4,2 \text{ К}) = 3,98\mu_B$<br>$\mu_{\text{Fe II}}(4,2 \text{ К}) = 3,60\mu_B$                     | [3]        |
| $\text{Fe}_2\text{TeO}_6$          | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$  | $\mu \parallel C$                                       | 201—218   | Магнитоэлектрик<br>$\mu_{\text{Fe}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 4,19\mu_B$                                                  | [3, 17]    |
| $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\mu \parallel [c]$<br>$c < a < b$                      | 720—730   | $\theta = -615 \text{ К}$<br>$\mu_{\text{Fe}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 4,5\mu_B$                                         | [3, 17]    |
| $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС, $\mu \parallel [c]$                                 | 600—700   | $\mu_{\text{Fe}^{3+}}(77 \text{ К}) = 4,5\mu_B$                                                                       | [3, 17]    |
| $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ | Гексагональная $C_{6v}^4$     | $\mu \parallel C$                                       | 59,5      | $\theta_{\perp} < -200 \text{ К}$ , $\theta_{\parallel} = -75 \text{ К}$<br>$p_{\perp} = 4,4$ , $p_{\parallel} = 5,8$ | [79]       |
| $\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$ | Моноклиная $C_{2h}^6$         | $\mu \perp [001]$                                       | 375—381   | $\mu_0 H_{\text{эф}} = 51,0 \text{ Тл}^{*1}$                                                                          | [3, 17]    |
| $\alpha\text{-FeOOH}$              | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС, $\mu \parallel [b]$                                 | 330—403   | $p = 6,4$ , $\mu_{\text{Fe}^{3+}}(77 \text{ К}) = 5\mu_B$                                                             | [3, 17]    |
| $\beta\text{-FeOOH}$               | Тетрагональная $C_{4h}^5$     | $\mu \parallel C$                                       | 273—285   | $\theta = -640 \text{ К}$ , $\mu_{\text{Fe}^{3+}}(77 \text{ К}) = 5\mu_B$                                             | [3]        |
| $\gamma\text{-FeOOH}$              | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | КС, ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                       | 50—75     | $p = 4,9$                                                                                                             | [3]        |
| $\delta\text{-FeOOH}$              | Тригональная $D_{3d}^4$       | $\mu \perp C$                                           | 450—460   | $\mu_{\text{Fe I}} = \mu_{\text{Fe II}}(77 \text{ К}) = 5\mu_B$                                                       | [3]        |

\*1 Эффективное поле сверхтонкого взаимодействия, усредненное по трем неэквивалентным позициям ионов  $\text{Fe}^{3+}$ .

| Вещество                                                                                                                           | Структура                                                    |                                                        | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                            | Литература |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                                                                    | кристаллографическая                                         | магнитная                                              |           |                                                                                                                                                    |            |
| $\text{LiFePO}_4$                                                                                                                  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                | —                                                      | 53        | $\mu_0 H_E = 43,0$ Тл                                                                                                                              | [17]       |
| $\text{FeTiNdO}_5$                                                                                                                 | Орторомбическая $D_{2h}^9$                                   | НКС<br>( $a, b, 2c$ )                                  | —         | —                                                                                                                                                  | [3]        |
| $\text{FeCrWO}_6$                                                                                                                  | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                 | КС, $\mu \parallel C$                                  | —         | —                                                                                                                                                  | [3]        |
| $\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$                                                                                                        | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$                                | $\mu \parallel [a]$                                    | 60        | —                                                                                                                                                  | [17]       |
| $\text{FeCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                                                                          | Моноклиная $C_{2h}^3$                                        | $\mu \parallel (101)$<br>$\alpha(\mu, [a]) = 58^\circ$ | 23        | Метамagnetик<br>$\mu_0 H_{c1} = 3,92$ Тл<br>$\mu_0 H_{c2} = 4,56$ Тл                                                                               | [17]       |
| $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$                                                                                          | Моноклиная                                                   | $\mu \parallel [b]$                                    | 1         | $\chi_M(T_N)/4\pi = 0,105$ см <sup>3</sup> /моль                                                                                                   | [17]       |
| $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$                                                                                                 | Моноклиная $C_{2h}^5$                                        | —                                                      | 0,129     | —                                                                                                                                                  | [17]       |
| $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$                                                                                           | Моноклиная $C_{2h}^6$                                        | КС, $\mu \parallel [c]$                                | —         | —                                                                                                                                                  | [3]        |
| $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                                                                 | —                                                            | —                                                      | 20        | —                                                                                                                                                  | [17]       |
| $\text{Cs}_2\text{FeF}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                                                                | Орторомбическая $D_{2h}^7$                                   | $\mu \parallel [a]$                                    | 2,4       | Анизотропия типа ЛО                                                                                                                                | [80]       |
| $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$                                                                             | Моноклиная $C_{2h}^5$                                        | НКС, $\sigma \parallel [b]$                            | 15—20     | $\sigma_M = 4,46$ А·м <sup>2</sup> /моль<br>$\mu_{\text{Fe}^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 0,82\mu_B$                                                      | [3, 17]    |
| $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$                                                                             | Моноклиная $C_{2h}^3$                                        | $\mu \parallel (101)$                                  | 8—12      | $\mu_{\text{Fe}} = 4\mu_B$                                                                                                                         | [3, 17]    |
| $\text{Fe}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                                                               | Моноклиная $C_{2h}^5$                                        | $\sigma \parallel [b]$                                 | 3,7       | $\sigma \neq 0$<br>$\mu_{\text{Fe}}(1,5 \text{ К}) = 3,7\mu_B$<br>Магнитные моменты Fe II<br>упорядочиваются при<br>$T_{N_2} = 0,4$ К              | [3, 17]    |
| $\text{Fe}(\text{NH}_4) \cdot (\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$                                                          | —                                                            | —                                                      | 0,043     | $\chi_M(T_N)/4\pi = 1,0$ см <sup>3</sup> /моль                                                                                                     | [17]       |
| $[\text{Fe}(\text{C}_{13}\text{H}_{17}\text{N}_9)_2] \cdot \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$<br>(органометаллический полимер) | —                                                            | —                                                      | >300      | В малых магнитных полях<br>переходит в ферромагнитную<br>фазу ( $\mu_0 H < 6 \cdot 10^{-2}$ Тл)                                                    | 81         |
| CoO                                                                                                                                | Кубическая $O_h^5$ (тетрагональные искажения при $T < T_N$ ) | $\alpha(\mu, [001]) = 27,4^\circ$<br>( $2a, 2a, 2a$ )  | 291—292   | $\theta = -280$ К, $p = 4,96$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 5,3 \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_{\text{Co}^{2+}}(77 \text{ К}) = 3,52\mu_B$ | [3, 17]    |

| Вещество                       | Структура                    |                                               | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                      | Литература |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                | кристаллографическая         | магнитная                                     |           |                                                                                                                                                                                                                                              |            |
| CoS                            | Гексагональная $D_{6h}^4$    | —                                             | 358       | $\theta = -632$ К, $p = 1,7$                                                                                                                                                                                                                 | [17]       |
| CoF <sub>2</sub>               | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$ | $\mu \parallel [001]$                         | 37,7      | $\theta = -52,7$ К<br>$\mu_{Co} (0 \text{ К}) = 180 \text{ МГц}^{*1}$<br>$\lambda_1 (0) = 351 \text{ мкм}^{*2}$<br>$\lambda_2 (0) = 278 \text{ мкм}$<br>$\mu_0 H_{c\perp} = 12,0 \text{ Тл}^{*3}$<br>$\mu_{Co^{2+}} (23 \text{ К}) = 3\mu_B$ | [3, 17]    |
| CoCl <sub>2</sub>              | Тригональная $D_{3d}^5$      | ФВ в (111)<br>АФВ между (111)<br>(2a, 2a, 2a) | 25        | $\theta = 20$ К<br>$\mu_{Co^{2+}} (4,2 \text{ К}) = 3,15\mu_B$<br>Магнитные свойства при<br>$T > T_N$ соответствуют<br>модели двумерного анти-<br>ферромагнетика                                                                             | [3, 17]    |
| CoBr <sub>2</sub>              | Тригональная $D_{3d}^3$      | $\mu \parallel (001)$<br>(a, a, 2a)           | 19        | $\mu_{Co} (4,2 \text{ К}) = 2,86\mu_B$<br>Магнитные свойства при<br>$T > T_N$ соответствуют<br>модели двумерного анти-<br>ферромагнетика                                                                                                     | [3, 17]    |
| $\alpha$ -CoI <sub>2</sub>     | Тригональная $D_{3d}^3$      | $\mu \parallel C$                             | 3         | —                                                                                                                                                                                                                                            | [17]       |
| CoSe <sub>2</sub>              | Кубическая $T_h^6$           | (a, a, 2a)                                    | 93        | $\theta = -160$ К, $p = 2,2$<br>$\mu_{Co} (4,2 \text{ К}) = 1\mu_B$<br>Полупроводник                                                                                                                                                         | [3, 17]    |
| CoF <sub>3</sub>               | Тригональная $D_{3d}^6$      | КС, $\mu \parallel [111]$                     | 460       | $\mu_{Co} (4,2 \text{ К}) = 4,4\mu_B$                                                                                                                                                                                                        | [3, 17]    |
| Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | Кубическая $O_h^7$           | $\mu \parallel [001]$                         | 40        | $\theta = -53$ К, $p = 4,14$<br>$\mu_{Co^{2+}} (4,2 \text{ К}) = 3,25\mu_B$                                                                                                                                                                  | [3, 17]    |
| CoCO <sub>3</sub>              | Тригональная $D_{3d}^6$      | $\mu \perp C^{*4}$<br>$\sigma \perp C$        | 18,1      | $\theta = -52$ К, $p = 4,34$<br>Анизотропия типа ЛП<br>$\sigma_{\perp} (0 \text{ К}) = 1,4 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$<br>$\mu_0 H_D = 2,7 \div 5,1 \text{ Тл}^{*5}$                                                             | [2, 3, 86] |

\*1 Центральная частота квадрупольно-расщепленного спектра, состоящего из семи линий ( $I = 7/2$ ) [82].

\*2 При  $H \parallel [001]$  g-факторы для  $\lambda_1 (H)$  и  $\lambda_2 (H)$  соответственно равны  $g_1 = 1,18$  и  $g_2 = 2,80$ .

\*3 В интервале  $H_{c\parallel,1} < H < H_{c\parallel,2}$  ( $\mu_0 H_{c\parallel,1} = 21 \text{ Тл}$ ,  $\mu_0 H_{c\parallel,2} = 25,5 \text{ Тл}$ ) реализуется угловая фаза, в которой моменты под-  
решеток отклонены от оси  $C_4$  на разные углы [83].

\*4  $\sigma_{\perp} > \sigma_{\parallel} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$  [84].

\*5 Сводку значений  $H_D$ , измеренных различными авторами, см. в [85].

| Вещество                    | Структура                                                                                       |                                                              | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                      | Литература |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                             | кристаллографическая                                                                            | магнитная                                                    |           |                                                                                                                                              |            |
| CoTiO <sub>3</sub>          | Тригональная $C_{3i}^2$                                                                         | $\mu \parallel (111)$<br>(2a, 2a, 2a)                        | 37—42     | $\theta = -9,3$ К, $p = 5,46$                                                                                                                | [3, 17]    |
| CoGeO <sub>3</sub>          | Моноклинная $C_{2h}^6$                                                                          | —                                                            | 8,5       | $\theta = -14$ К, $p = 5,33$                                                                                                                 | [17]       |
| NaCoF <sub>3</sub>          | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                                                   | КС, $\mu \parallel [b]$                                      | 74—78     | $\mu_{Co^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,4\mu_B$                                                                                                    | [3]        |
| KCoF <sub>3</sub>           | Кубическая $O_h^1$<br>(тетрагональные искажения при $T < 78$ К)                                 | G-тип МП<br>(2a, 2a, 2a)                                     | 135—144   | $\theta = -125$ К<br>$^{59}\nu_{Co} = 372,7$ МГц*1<br>$\mu_{Co^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,3\mu_B$                                              | [3, 17]    |
| RbCoF <sub>3</sub>          | Кубическая $O_h^1$<br>(тетрагональные искажения при $T < 101$ К, $c/a = 0,997$ при $T = 4,2$ К) | G-тип МП<br>(2a, 2a, 2a)                                     | 98        | $\theta = -180$ К, $p = 5,53$<br>$\mu_{Co}(4,2 \text{ К}) = 3\mu_B$                                                                          | [3, 6, 17] |
| CsCoF <sub>3</sub>          | Тригональная $D_{3d}^5$                                                                         | —                                                            | 8         | $\theta = -62$ К                                                                                                                             | [6]        |
| RbCoCl <sub>3</sub>         | Гексагональная $D_{6h}^4$                                                                       | —                                                            | 18        | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$                                                                                      | [6]        |
| CsCoCl <sub>3</sub>         | Гексагональная $D_{6h}^4$                                                                       | КС при $T > 9,2$ К                                           | 21        | $\theta = -100$ К<br>Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$ ; $ J'/J  = 1,6 \cdot 10^{-2}$<br>Ферримagnetик при $T < 9,2$ К | [6]        |
| RbCoBr <sub>3</sub>         | Гексагональная $D_{6h}^4$                                                                       | КС, $\mu \parallel C$<br>( $\sqrt{3}a$ , $\sqrt{3}a$ , $c$ ) | 36        | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$<br>$\mu_{Co}(4,4 \text{ К}) = 3,4\mu_B$                                              | [3, 6, 17] |
| CsCoBr <sub>3</sub>         | Гексагональная $D_{6h}^4$                                                                       | КС при $T > 15$ К<br>$\mu \parallel C$                       | 28        | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$<br>Ферримagnetик при $T < 15$ К                                                      | [6]        |
| $\alpha$ -CoSO <sub>4</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$                                                                   | НКС                                                          | 12—15     | $\theta = -47$ К, $p = 5,65$<br>$\mu_{Co^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,3\mu_B$                                                                    | [3]        |

\*1 Значение центральной частоты квадрупольно-расщепленного спектра, состоящего из семи линий со средним интервалом между линиями  $\Delta\nu = 2,1$  МГц [87].



| Вещество                          | Структура                     |                                                                      | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                           | Литература  |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                   | кристаллографическая          | магнитная                                                            |           |                                                                                                                                                                   |             |
| $\beta$ -CoSO <sub>4</sub>        | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС                                                                  | 12—15     | $\theta = -24$ К, $p = 5,65$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 62 \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_0 H_c, [a] = 1,2$ Тл<br>$\mu_{Co}(4,2 \text{ К}) = 3,8\mu_B$ | [3, 17]     |
| CoSeO <sub>4</sub>                | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС                                                                  | 30        | $p = 3,64$                                                                                                                                                        | [3]         |
| CoWO <sub>4</sub>                 | Моноклинная $C_{2h}^4$        | $\mu \parallel (010)$<br>ФВ в (100)<br>АФВ между (100)<br>(2a, b, c) | 55        | $\theta/T_N = -1,55$                                                                                                                                              | [3]         |
| CoUO <sub>4</sub>                 | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$ | НКС, $\mu \parallel [a]$ и $\mu \parallel [c]$<br>(2a, b, 2c)        | 12        | $\theta = -23$ К<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 83 \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_{Co}(4,2 \text{ К}) = 4,06\mu_B$                                         | [3, 17]     |
| BaCoF <sub>4</sub>                | Орторомбическая $C_{2v}^{12}$ | $\mu \parallel [a]$                                                  | 70        | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$<br>$\mu_{Co^{2+}}(4,7 \text{ К}) = 3,4\mu_B$                                                              | [3]         |
| CoRh <sub>2</sub> O <sub>4</sub>  | Тетрагональная                | —                                                                    | 27        | $\theta = -30$ К                                                                                                                                                  | [17]        |
| K <sub>2</sub> CoF <sub>4</sub>   | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$<br>(2a, 2a, c)                                     | 107—125   | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$ ; $ J'/J  \approx 10^{-6}$<br>$H_A/H_E = 0,7$                                                             | [3, 17, 88] |
| Rb <sub>2</sub> CoF <sub>4</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | —                                                                    | 101       | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$ ; $ J'/J  \approx 10^{-6}$<br>$H_A/H_E = 0,8$                                                             | [88]        |
| CoNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{14}$ | $\mu \parallel [a]$<br>(a, b, 2c)                                    | —         | —                                                                                                                                                                 | [3]         |
| CoCs <sub>3</sub> Cl <sub>6</sub> | Тетрагональная                | —                                                                    | 0,52      | —                                                                                                                                                                 | [17]        |
| CoCs <sub>3</sub> Br <sub>6</sub> | Тетрагональная                | —                                                                    | —         | —                                                                                                                                                                 | [17]        |
| Co <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС<br>C <sub>y</sub> -тип МП                                         | 49        | $\theta = -65$ К, $p = 5,09$<br>$\mu_{Co^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,3\mu_B$                                                                                         | [3, 17]     |
| GeCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>  | Кубическая $O_h^7$            | $\mu \parallel (111)$<br>(2a, 2a, 2a)                                | 20        | $\theta = -90$ К, $p = 4,7$<br>$\mu_{Co^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3,2\mu_B$                                                                                          | [3]         |

| Вещество                                  | Структура                                                       |                                                                        | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                            | Литература |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                           | кристаллографическая                                            | магнитная                                                              |           |                                                                                                                                                                                                                    |            |
| $\text{Co}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$        | Гексагональная $C_{6v}^4$                                       | $\mu \parallel C$                                                      | 40,8      | $\theta_{\perp} = -185 \text{ К}$ , $p_{\perp} = 5,9$<br>$\theta_{\parallel} = -95 \text{ К}$ , $p_{\parallel} = 5,8$                                                                                              | [79]       |
| $\text{Co}_3\text{B}_2\text{O}_6$         | Орторомбическая $D_{2h}^{12}$                                   | КС, $\mu \parallel [c]$<br>( $a$ , $2b$ , $2c$ )                       | 30—37     | $\theta = -63 \text{ К}$ , $p = 5,29$                                                                                                                                                                              | [3]        |
| $\text{Nb}_2\text{Co}_4\text{O}_9$        | Тригональная $D_{3d}^4$                                         | КС, $\mu \parallel C$                                                  | 30        | $\theta = -10 \text{ К}$ , $p = 4$<br>$\mu_{\text{Co}^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 3\mu_B$                                                                                                                               | [3, 17]    |
| $\text{Ta}_2\text{Co}_4\text{O}_9$        | Тригональная $D_{3d}^4$                                         | —                                                                      | 206*1     | —                                                                                                                                                                                                                  | [17]       |
| $\text{LiCoPO}_4$                         | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                   | КС<br>$A_y$ -тип МП                                                    | 23        | $\theta = -90 \text{ К}$ , $p = 5,7$<br>$\mu_0 H_E = 32 \text{ Тл}$                                                                                                                                                | [3, 17]    |
| $\text{NH}_4\text{CoF}_3$                 | Кубическая $O_h^1$<br>(тетрагональные искажения при $T < T_N$ ) | G-тип МП                                                               | 124       | $\sigma \neq 0$ при $T < T_N$                                                                                                                                                                                      | [89]       |
| $\text{Na}_2\text{CoSiO}_4$               | Орторомбическая $C_{2h}^5$                                      | $\mu \perp [b]$<br>( $2a$ , $b$ , $2c$ )                               | 4         | $\mu_{\text{Co}}(1,2 \text{ К}) = 2,7\mu_B$                                                                                                                                                                        | [3]        |
| $\text{Na}_2\text{CoGeO}_4$               | Орторомбическая $C_{2h}^5$                                      | $\alpha(\mu, [b]) = 80^\circ$<br>( $2a$ , $b$ , $c$ )                  | 4         | $\mu_{\text{Co}}(1,2 \text{ К}) = 3,0\mu_B$                                                                                                                                                                        | [3]        |
| $\text{BaCoWO}_6$                         | Кубическая $O_h^5$                                              | $\alpha(\mu, [111]) = 20^\circ$                                        | —         | —                                                                                                                                                                                                                  | [17]       |
| $\text{Ba}_2\text{CoWO}_4$                | Кубическая $O_h^5$                                              | II тип МП<br>$\alpha(\mu, [111]) = 23^\circ$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ ) | 17        | $\mu_{\text{Co}}(4,2 \text{ К}) = 2,0\mu_B$                                                                                                                                                                        | [3]        |
| $\text{Ba}_2\text{CoUO}_4$                | Кубическая $O_h^5$                                              | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                                          | 9         | $\mu_{\text{Co}} = 1,35\mu_B$                                                                                                                                                                                      | [3]        |
| $\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | Моноклинная $C_{2h}^3$                                          | $\mu \parallel [b]$                                                    | 18        | Метамagnetик<br>$\mu_0 H_{c1}, [b] = 3,2 \text{ Тл}$<br>( $\Delta m = 1\mu_B$ )<br>$\mu_0 H_{c2}, [b] = 4,6 \text{ Тл}$ ( $\Delta m = 3\mu_B$ )<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 21 \times 10^{-2} \text{ см}^3/\text{моль}$ | [3, 17]    |
| $\text{CoBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | Моноклинная $C_{2h}^3$                                          | $\mu \parallel [b]$                                                    | 9,5       | $\theta = 0 \text{ К}$<br>Метамagnetик<br>$\mu_0 H_{c1}, [b] = 1,37 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_{c2}, [b] = 2,98 \text{ Тл}$                                                                                           | [17]       |

\*1 Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

| Вещество                                                                                       | Структура                                                     |                                                    | $T_N$ , К             | Дополнительные сведения                                                                                                                                                               | Литература |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                                | кристаллографическая                                          | магнитная                                          |                       |                                                                                                                                                                                       |            |
| $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                                                      | Моноклинная $C_{2h}^3$                                        | $\mu \parallel [c]$<br>( $a$ , $b$ , $2c$ )        | 2,3                   | $\theta = -20$ К<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 17,8 \times 10^{-2}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu_{\text{Co}^{2+}}(1,5 \text{ К}) = 3,8\mu_B$                                                | [3, 17]    |
| $\text{CoBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                                                      | Моноклинная $C_{2h}^3$                                        | —                                                  | 3,2                   | —                                                                                                                                                                                     | [17]       |
| $\text{Co}(\text{NC}_5\text{H}_5)\text{Cl}_2$                                                  | Моноклинная                                                   | —                                                  | 3,7                   | $\theta = -4$ К,<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 2,8$ см <sup>3</sup> /моль                                                                                                                    | [17]       |
| $\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6 \cdot \text{SiF}_6$                                           | Тригональная                                                  | $\sigma \perp C$                                   | 0,15                  | $\sigma = 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot 2M_0^{*1}$                                                                                                                                          | [17]       |
| $\text{CoCl}_2[(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{CS}]_4$                                             | Тетрагональная $C_{4h}^4$                                     | —                                                  | 0,92 <sup>*2</sup>    | —                                                                                                                                                                                     | [17]       |
| $\text{CoK}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                                        | —                                                             | —                                                  | 0,193                 | —                                                                                                                                                                                     | [17]       |
| $\text{Co}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                           | Моноклинная $C_{2h}^5$                                        | $\mu \parallel (100)$                              | 5,1                   | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$                                                                                                                               | [17]       |
| $\text{Co}(\text{NH}_4)_2 \cdot (\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                     | Моноклинная                                                   | —                                                  | 0,084                 | $\sigma \approx 7,1 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$                                                                                                                           | [17]       |
| $[\text{Co}(\gamma\text{-CH}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_4\text{NO})_6] \cdot (\text{ClO}_4)_2$ | Моноклинная                                                   | —                                                  | 0,49                  | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$                                                                                                                               | [90]       |
| NiO                                                                                            | Кубическая $O_h^5$<br>(ромбоэдрические искажения ниже $T_N$ ) | $\mu \parallel (111)$<br>II тип МП                 | 523                   | $\theta = -2470$ К, $p = 4,6$<br>$\lambda(0) = 274$ мкм                                                                                                                               | [3, 17]    |
| NiS                                                                                            | Гексагональная $D_{6h}^4$                                     | $\mu \parallel C$<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001) | 263—265 <sup>*3</sup> | $\mu_{\text{Ni}}(4,2 \text{ К}) = 1,8\mu_B$                                                                                                                                           | [3, 17]    |
| NiAs                                                                                           | Гексагональная $D_{6h}^4$                                     | $\mu \perp C$                                      | 150                   | $\theta = -300$ К                                                                                                                                                                     | [17]       |
| NiF <sub>2</sub>                                                                               | Тетрагональная $D_{4h}^{14}$                                  | НКС<br>$\sigma \parallel [010]$                    | 73                    | $\theta = -100$ К<br>$\sigma = 0,35 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$<br>$\lambda_1(0) = 3000$ мкм<br>$\lambda_2(0) = 320$ мкм<br>$\mu_{\text{Ni}^{2+}}(23 \text{ К}) = 2\mu_B$ | [2, 3]     |

\*1  $2M_0 = Nng\mu_B s$ , где  $N$  — число Авогадро,  $n$  — число магнитных ионов в молекуле,  $g$  — фактор Ланде,  $s$  — спин магнитного иона.

\*2 Из измерений теплоемкости.

\*3 Переход  $\text{II} \rightarrow \text{АФ}$  обладает свойствами, характерными для перехода первого рода; в точке перехода изменяются параметры кристаллической ячейки:  $\Delta a/a = 3 \cdot 10^{-3}$ ;  $\Delta c/c = 10^{-3}$ .

| Вещество            | Структура                     |                                                                      | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Литература      |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                     | кристаллографическая          | магнитная                                                            |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                 |
| NiCl <sub>2</sub>   | Тригональная $D_{3d}^5$       | $\mu \perp C$                                                        | 52        | $\theta = 67$ К                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | [17]            |
| NiBr <sub>2</sub>   | Тригональная $D_{3d}^5$       | —                                                                    | 60        | $\theta = -20$ К, $p = 3,0$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | [17]            |
| NiCO <sub>3</sub>   | Тригональная $D_{3d}^6$       | НКС<br>$\sigma \perp C$<br>$\alpha(\mu, [111]) = 63^\circ$           | 25        | $\sigma_M(4,2 \text{ К}) = 2,08 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$<br>$\mu_0 H_D = 9,0 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_E = 24,0 \text{ Тл}$                                                                                                                                                                                                   | [3, 17, 84]     |
| NiTiO <sub>3</sub>  | Тригональная $C_{3i}^2$       | $\mu \perp [111]$<br>ФВ в (111)<br>АФВ между (111)<br>( $a, a, 2a$ ) | 23        | $\theta = -11$ К, $p = 3,2$<br>$\lambda(0) = 1,6 \text{ мм}$<br>$\mu_{Ni}(4,2 \text{ К}) = 2,2\mu_B$                                                                                                                                                                                                                                       | [3, 17]         |
| NaNiF <sub>3</sub>  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>$\mu \parallel (010)$<br>$\sigma \parallel [c]$               | 138—156   | $\theta = -280$ К<br>$\sigma_M = 0,335 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$<br>$\mu_0 H_D = 16,2 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_A = 1,2 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_E = 200 \text{ Тл}^{*1}$<br>$\mu_{Ni}(4,2 \text{ К}) = 2\mu_B$                                                                                                                 | [3, 17]         |
| KNiF <sub>3</sub>   | Кубическая $O_h^1$            | G-тип МП<br>$\mu \parallel [001]$<br>( $2a, 2a, 2a$ )                | 275       | $\theta = -234$ К<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 2,05 \times 10^{-3} \text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_{Ni^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 2,2\mu_B$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 3$<br>$\mu_0 H_E = 3,6 \cdot 10^2 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_A = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$                                               | [3, 6, 17, 66]  |
| CsNiF <sub>3</sub>  | Гексагональная $D_{6h}^4$     | $\mu \perp C$                                                        | 2,61      | Магнитные свойства соответствуют XY-модели, $d = 1$                                                                                                                                                                                                                                                                                        | [6]             |
| RbNiCl <sub>3</sub> | Гексагональная $D_{6h}^4$     | ГС                                                                   | 11        | $\theta = -101$ К<br>$\mu_{Ni^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 1,5\mu_B$<br>$ J'/J  = 2 \cdot 10^{-2}$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$                                                                                                                                                                               | [3, 6, 17]      |
| CsNiCl <sub>3</sub> | Гексагональная $D_{6h}^4$     | ГС при $T > T_H = 4,4$ К<br>$\mu \parallel (010)$ при $T < T_H$      | 4,85      | $\theta = -69$ К, $p = 3,41$<br>$\chi_{\parallel}(0 \text{ К})/4\pi = 3,5 \times 10^{-3} \text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\chi_{\perp}(0 \text{ К})/4\pi = 7,3 \times 10^{-3} \text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_{Ni^{2+}}(1,6 \text{ К}) = 1\mu_B$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d=1$ ; $ J'/J  = 6 \cdot 10^{-2}$ | [3, 6, 17, 119] |

\*1 Значения эффективных полей получены из экспериментов по АФМР в предположении анизотропного эффективного g-фактора подрешеток:  $g_{xx} \approx g_{zz} = 2,14$ ;  $g_{xz} = g_{zx} = -2,5 \cdot 10^{-2}$  ( $x, y, z$  направлены соответственно вдоль осей  $[a], [b], [c]$ ).

| Вещество                         | Структура                     |                                                          | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                | Литература |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                  | кристаллографическая          | магнитная                                                |           |                                                                                                                                                                                        |            |
| TiNiCl <sub>3</sub>              | Гексагональная $D_{6h}^4$     | НКС                                                      | 13        | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J'/J  = 2 \cdot 10^{-2}$                                                                                              | [6]        |
| NiSO <sub>4</sub>                | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | КС, $\mu \parallel [b]$<br>ФВ в (010)<br>АФВ между (010) | 37        | $\theta = -82$ К, $p = 3,82$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 15 \times 10^{-3}$ см <sup>3</sup> /моль<br>$\mu(4,2$ К) = $2,1\mu_B$                                                              | [3, 17]    |
| NiCrO <sub>4</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | КС<br>$A_x$ -тип МП                                      | 23        | $\theta = -105$ К<br>$\mu_{Ni^{2+}}(4,2$ К) = $1,28\mu_B$                                                                                                                              | [3]        |
| NiSeO <sub>4</sub>               | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | $\mu \perp [c]$<br>$A_{xy}$ -тип МП                      | 27        | $p = 2,14$                                                                                                                                                                             | [3]        |
| BaNiF <sub>4</sub>               | Орторомбическая $C_{2v}^{12}$ | КС, $\mu \parallel [b]$<br>( $a, 2b, 2c$ )               | 150       | $\mu_{Ni}(4,2$ К) = $1,96\mu_B$                                                                                                                                                        | [3, 17]    |
| Ni(OH) <sub>2</sub>              | Тригональная $D_{3d}^3$       | КС, $\mu \parallel C$                                    | 28—35     | $p = 3,2$<br>$\mu_{Ni}(78$ К) = $2,0\mu_B$                                                                                                                                             | [3]        |
| K <sub>2</sub> NiF <sub>4</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$                                        | 97        | $\theta = -600$ К<br>$\mu_0 H_{c\parallel}(4,2$ К) = 18,0 Тл<br>$H_A/H_E = 2 \cdot 10^{-3}$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$ ; $ J'/J  \approx 10^{-6}$ | [6, 17]    |
| Rb <sub>2</sub> NiF <sub>4</sub> | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$                                        | 91        | $ T_N/\theta  = 0,41$<br>$\mu_0 H_{c\parallel}(4,2$ К) = 35,0 Тл<br>$H_A/H_E = 10^{-2}$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$ ; $ J'/J  = 10^{-6}$           | [6, 17]    |
| NiRh <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Тетрагональная                | —                                                        | 18        | $\theta = -20$ К                                                                                                                                                                       | [17]       |
| Tl <sub>2</sub> NiF <sub>4</sub> | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | —                                                        | 101       | $T_N/\theta = -0,42$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$ ; $ J'/J  = 10^{-6}$                                                                              | [6, 17]    |
| NiSiO <sub>4</sub>               | Орторомбическая               | —                                                        | 8,2       | $\theta = 14$ К                                                                                                                                                                        | [17]       |
| Ba <sub>2</sub> NiF <sub>6</sub> | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$<br>( $2a, 2a, c$ )                     | 93        | $\mu_{Ni^{2+}}(4,2$ К) = $1,9\mu_B$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$                                                                                    | [78]       |

| Вещество                                                                            | Структура                     |                                                | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                          | Литература |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                     | кристаллографическая          | магнитная                                      |           |                                                                                                  |            |
| $\text{GeNi}_2\text{O}_4$                                                           | Кубическая $O_h^7$            | $\mu \parallel (111)$<br>(2a, 2a, 2a)          | 15—16     | $\theta = -6$ К, $p = 3,24$<br>$\mu_{\text{Ni}^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 2,2\mu_B$                  | [3, 17]    |
| $\text{Ni}_3\text{B}_2\text{O}_6$                                                   | Орторомбическая $D_{2h}^{12}$ | НКС<br>(a, 2b, 2c)                             | 49        | $\theta = -5$ К, $p = 3,07$                                                                      | [3]        |
| $\text{LiNiPO}_4$                                                                   | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС<br>$A_2$ -тип МП                            | 23        | $\theta = -79$ К, $p = 3,35$                                                                     | [3]        |
| $\text{SrNiMoO}_6$                                                                  | —                             | —                                              | 71,5      | —                                                                                                | [17]       |
| $\text{NH}_4\text{NiCl}_3$                                                          | Гексагональная $D_{6h}^4$     | НКС                                            | 9         | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$                                     | [6]        |
| $\text{Na}_2\text{NiAlF}_3$                                                         | Орторомбическая $C_{2v}^{20}$ | НКС<br>$\sigma \parallel [b]$ при $T < 11$ К   | 90        | Слабый ферромагнетик при $T < 11$ К                                                              | [3]        |
| $\text{Ba}_2\text{NiWO}_6$                                                          | Кубическая $O_h^5$            | $\mu \perp [111]$<br>II тип МП<br>(2a, 2a, 2a) | 17        | $\mu_{\text{Ni}}(4,2 \text{ К}) = 1,9\mu_B$                                                      | [3, 17]    |
| $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                                           | Моноклинная $C_{2h}^3$        | $\alpha(\mu, [a]) = 22^\circ$<br>(a, b, 2c)    | 5,34—5,8  | $\theta = -7$ К                                                                                  | [3, 17]    |
| $\text{NiBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                                           | —                             | —                                              | 6,5*1     | —                                                                                                | [17]       |
| $\text{Ni}_3\text{B}_4\text{O}_{13}\text{I}$                                        | —                             | —                                              | 120       | —                                                                                                | [17]       |
| $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                | Моноклинная                   | $\mu \parallel [a]$                            | 4,2       | $\theta = -2,5$ К                                                                                | [17]       |
| $\text{Ni}(\text{IO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                | —                             | —                                              | 3,08      | $\theta = -5$ К<br>$\sigma_{\text{уд}}(0 \text{ К}) = 1,45 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ | [91]       |
| $\text{Ni}(\text{IO}_3)_2 \cdot 2\text{D}_2\text{O}$                                | Орторомбическая $D_{2h}^{15}$ | НКС                                            | 3,1       | $\sigma \neq 0$<br>$\mu_{\text{Ni}} = 2\mu_B$                                                    | [3]        |
| $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{NH}_3$                                       | Кубическая                    | —                                              | 1,35*1    | $\theta = -3,3$ К                                                                                | [17]       |
| $\text{Ni}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                | Моноклинная $C_{2h}^5$        | $\mu \parallel (100)$                          | 15,7*2    | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$                                     | [17]       |
| $\text{Ni}(\text{NH}_3)_2 \cdot \text{Ni}(\text{CN})_4 \cdot 2\text{C}_6\text{H}_6$ | Тетрагональная $C_{4h}^1$     | $\mu \parallel C$                              | 2,37      | $\mu_0 H_{c\parallel} = 3,5 \text{ Тл}$<br>$\mu_0 H_A(1,46 \text{ К}) = 2,2 \text{ Тл}$          | [17]       |

\*1 Из измерений теплоемкости.

\*2 При этой температуре упорядочиваются магнитные моменты только в плоскостях (100). Система моментов плоскостей (200) обуславливает парамагнитные свойства при температуре ниже  $T_N$ . При  $T = 3,1$  К наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости.

| Вещество                              | Структура                                        |                                                                             | $T_N$ , К                               | Дополнительные сведения                                                                                                           | Литература |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                       | кристаллографическая                             | магнитная                                                                   |                                         |                                                                                                                                   |            |
| CuO                                   | Моноклинная $C_{2h}^6$                           |                                                                             | 230                                     | $\mu_{Cu} \leq 0,5\mu_B$                                                                                                          | [17]       |
| CuF <sub>2</sub>                      | Моноклинная $C_{2h}^5$                           | HKC<br>$\mu \parallel (a, b)$<br>$\sigma \parallel (010)$<br>( $2a, b, c$ ) | 69—70                                   | $\theta = -200$ К<br>$\sigma_{уд} \leq 1$ А · м <sup>2</sup> /кг                                                                  | [3, 17]    |
| CuCl <sub>2</sub>                     | Моноклинная $C_{2h}^1$                           | —                                                                           | 23.9                                    | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$                                                                      | [92]       |
| CuBr <sub>2</sub>                     | Моноклинная $C_{2h}^1$                           | —                                                                           | 74                                      | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$ ; $ J'/J  = 7 \cdot 10^{-2}$                                         | [92]       |
| Cu <sub>2</sub> S <sub>6</sub>        | Тетрагональная                                   | —                                                                           | 373                                     | $\theta = -1694$ К, $p = 43$                                                                                                      | [17]       |
| KCuF <sub>3</sub>                     | Тетрагональная $D_{4h}^{18}$<br>и $D_{4h}^{5*1}$ | $\mu \parallel (a, b)$<br>А-тип МП                                          | $38 - D_{4h}^{18}$<br>$22 - D_{4h}^{5}$ | $\mu_{Cu^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 0,45\mu_B$<br>для $D_{4h}^{5}$<br>$\mu_{Cu^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 0,54\mu_B$<br>для $D_{4h}^{18}$ | [3, 17]    |
| CsCuCl <sub>3</sub>                   | Гексагональная $D_6^2$<br>или $D_6^3$            | ГС, $k_0 \parallel C$<br>$\mu \perp C$                                      | 10,7                                    | $\mu_{Cu^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 0,58\mu_B$                                                                                        | [93]       |
| CuSO <sub>4</sub>                     | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                    | $\mu \parallel [a]$                                                         | 35                                      | $\theta = -88$ К<br>$\mu_{Cu^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 0,83\mu_B$                                                                    | [3, 17]    |
| CuSeO <sub>4</sub>                    | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                    | КС, $\mu \parallel [c]$<br>ФВ в (001)<br>АФВ между (001)                    | 34                                      | $\mu_{Cu^{2+}}(7,2 \text{ К}) = 0,9\mu_B$                                                                                         | [3, 17]    |
| GdCuO <sub>4</sub>                    | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                     | —                                                                           | 3—5                                     | $\theta = -15$ К                                                                                                                  | [94]       |
| CuWO <sub>4</sub>                     | Моноклинная $C_{2h}^4$                           | —                                                                           | 90                                      | $\theta/T_N = -1,89$                                                                                                              | [3]        |
| La <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub>      | Орторомбическая                                  | $\mu \perp [b]$                                                             | 240                                     | $\mu = 1,1 \pm 0,3\mu_B$                                                                                                          | [123]      |
| CuCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O | Орторомбическая $D_{2h}^7$                       | $\mu \parallel [a]$<br>( $a, b, 2c$ )                                       | 4,3                                     | $\theta = 5$ К<br>$\mu_0 H_{c \parallel} = 0,65$ Тл                                                                               | [2, 3]     |
| CuCl <sub>2</sub> · 2D <sub>2</sub> O | Орторомбическая $D_{4h}^7$                       | $\mu \parallel [a]$                                                         | 4,3                                     | —                                                                                                                                 | [17]       |

\*1 Обе структуры наблюдались одновременно.

| Вещество                                                               | Структура               |                                                         | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                   | Литература |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                        | кристаллографическая    | магнитная                                               |           |                                                                                                                                                                                                           |            |
| $\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$                          | —                       | —                                                       | 270       | —                                                                                                                                                                                                         | [17]       |
| $\text{YBa}_2\text{CuO}_6$                                             | Тетрагональная          | $\mu \parallel C$                                       | 500       | $\mu = 0,48 \pm 0,05 \mu_B$                                                                                                                                                                               | [124]      |
| $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                             | —                       | —                                                       | 21*1      | —                                                                                                                                                                                                         | [17]       |
| $\text{LiCuCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                            | Моноклинная $C_{2h}^5$  | $\mu \parallel (101)$                                   | 5—6       | $\theta = -10 \text{ К}$ , $p = 1,8$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 30 \times 10^{-3} \text{ см}^3/\text{моль}$<br>$\mu_0 H_c \parallel = 1,0 \text{ Тл}^{*2}$<br>$\mu_{\text{Cu}^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 1 \mu_B$ | [3, 17]    |
| $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$                              | Триклинная $C_i^1$      | —                                                       | 0,029*1   | —                                                                                                                                                                                                         | [17]       |
| $\text{CuSeO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$                             | —                       | —                                                       | 0,046*1   | —                                                                                                                                                                                                         | [17]       |
| $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$                 | —                       | —                                                       | 0,45      | $\chi_M(T_N)/4\pi = 65 \times 10^{-3} \text{ см}^3/\text{моль}$                                                                                                                                           | [17]       |
| $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot (\text{OH})_2$                       | Моноклинная $C_{2h}^5$  | —                                                       | 1,86      | $\theta = -10 \text{ К}$                                                                                                                                                                                  | [17]       |
| $\text{Cu}(\text{HCO}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$                  | Моноклинная             | —                                                       | 17        | $\theta = -175 \text{ К}$ , $\sigma_M(0 \text{ К}) = 0,15 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{моль}$<br>Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$                                         | [17]       |
| $\text{CuK}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                | —                       | —                                                       | 0,05      | —                                                                                                                                                                                                         | [17]       |
| $\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | —                       | —                                                       | 250—280   | —                                                                                                                                                                                                         | [17]       |
| $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NH}_3 \cdot \text{CuCl}_3$               | Орторомбическая $D_2^4$ | $\mu \parallel (a, b)$<br>$\alpha(\mu, [b]) = 17^\circ$ | 2,21      | Магнитные свойства соответствуют модели ферромагнитных цепей $ J'/J  = 10^{-3}$                                                                                                                           | [95]       |
| $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NH}_3 \cdot \text{CuBr}_3$               | Орторомбическая $D_2^4$ | $\mu \parallel (a, b)$<br>$\alpha(\mu, [b]) = 25^\circ$ | 1,5       | Магнитные свойства соответствуют модели ферромагнитных цепей $ J'/J  = 10^{-3}$                                                                                                                           | [95]       |

\*1 Из измерений теплоемкости.

\*2 Поле опрокидывания подрешеток.



| Вещество                             | Структура                                                       |                                                                                                                | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                                                                                 | Литература |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                      | кристаллографическая                                            | магнитная                                                                                                      |           |                                                                                                                                                                                                                                         |            |
| $(C_2H_5NH_3)_2 \cdot CuCl_4$        | Орторомбическая $D_{2h}^{15}$                                   | ФВ в $(a, b)$<br>АФВ между $(a, b)$                                                                            | —         | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$<br>$\mu_0 H_{E_1} = 8 \cdot 10^{-2}$ Тл (между слоями)<br>$\mu_0 H_{E_2} = 50,0$ Тл (внутри слоя)<br>$\mu_0 H_c \parallel = 0,16$ Тл<br>$\mu_0 H_D = 1,2 \cdot 10^{-2}$ Тл | [17, 96]   |
| $Cu(NH_3)_4SO_4 \cdot H_2O$          | —                                                               | —                                                                                                              | 0,37*1    | $\theta = -1,2$ К                                                                                                                                                                                                                       | [17]       |
| $Cu \cdot (C_6H_5COO)_2 \cdot 3H_2O$ | Моноклинная                                                     | —                                                                                                              | 1,4       | Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$                                                                                                                                                                            | [17]       |
| $MoF_3$                              | Кубическая $O_h^1$                                              | —                                                                                                              | 185       | —                                                                                                                                                                                                                                       | [17]       |
| $AgF_2$                              | Орторомбическая $D_{2h}^{15}$                                   | $\mu \parallel (100)$<br>$\alpha (\mu, [c]) = 0,5^\circ$<br>$\sigma \parallel [b]$                             | 163       | $p = 2$<br>$\mu_{Ag^{2+}} (4,2 \text{ К}) = 0,66\mu_B$                                                                                                                                                                                  | [3]        |
| Ce                                   | Гексагональная $D_{6h}^4$                                       | Ферромагнитное упорядочение в плоскости, перпендикулярной $C$ , и АФВ между плоскостями, перпендикулярными $C$ | 13        | $\theta = -46$ К<br>$\mu \approx 0,6\mu_B$                                                                                                                                                                                              | [12, 14]   |
| CeS                                  | Кубическая $O_h^5$                                              | $\mu \parallel [111]$<br>II тип МП                                                                             | 7         | $\theta = -45$ К, $p = 2,57$<br>$\mu_{Ce} (4,2 \text{ К}) = 0,57\mu_B$                                                                                                                                                                  | [3]        |
| CeZn                                 | Кубическая $O_h^1$                                              | —                                                                                                              | 29—36     | $\theta = -18 \div -2$ К, $p = 2,3$                                                                                                                                                                                                     | [13]       |
| CeSb                                 | Кубическая $O_h^5$<br>(тетрагональные искажения при $T < T_N$ ) | Изменение структуры при $T = 15,5; 14,9; 13,5; 8,4$ К                                                          | 16—18     | $p = 2,58$<br>$\mu_{Ce} (4,2 \text{ К}) = 2,1\mu_B$                                                                                                                                                                                     | [3, 17]    |
| CeBi                                 | Кубическая $O_h^5$                                              | $\mu \parallel [001]$<br>I тип МП                                                                              | 25—26     | $\theta = -12$ К, $p = 2,38$<br>$\mu_{Ce} (4,2 \text{ К}) = 2,0\mu_B$                                                                                                                                                                   | [3, 17]    |
| CeC <sub>2</sub>                     | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                                    | $\mu \parallel C$<br>I тип МП                                                                                  | 33        | $\theta = 2,54$ ,<br>$\mu_{Ce} (4,2 \text{ К}) = 1,74\mu_B$                                                                                                                                                                             | [3]        |
| CeAl <sub>2</sub>                    | Кубическая $O_h^7$                                              | Несоизмеримая СВ                                                                                               | 3,9       | $n_s = 0,71^{*2}$                                                                                                                                                                                                                       | [97]       |
| CeZn <sub>2</sub>                    | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$                                   | $\mu \parallel [b]$                                                                                            | 7,5       | $\mu_{Ce} (4,2 \text{ К}) = 1,6\mu_B$                                                                                                                                                                                                   | [3]        |
| CeCl <sub>3</sub>                    | Гексагональная                                                  | —                                                                                                              | 0,345     | —                                                                                                                                                                                                                                       | [17]       |

\*1 Из измерений теплоемкости.

\*2 Магнитные характеристики CeAl<sub>2</sub> см. в [58, с. 74—75], результаты измерения намагниченности в сильных магнитных полях представлены в [98].

| Вещество                                                                                | Структура                                     |                                                                                                                                 | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                   | Литература |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                         | кристаллографическая                          | магнитная                                                                                                                       |           |                                                                                                                                                           |            |
| CeB <sub>6</sub>                                                                        | Кубическая (структура типа CaB <sub>6</sub> ) | НКС                                                                                                                             | 2,3       | $\mu_{\text{Ce}}(1,3 \text{ К}) = 0,7\mu_B$<br>Магнитные свойства соответствуют модели кондорешетки                                                       | [99]       |
| CeTiO <sub>3</sub>                                                                      | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                 | G-тип МП (Ti)<br>F-тип МП (Ce)                                                                                                  | 116       | $\mu_{\text{Ce}^{3+}}(81 \text{ К}) = 0,4\mu_B$<br>$\mu_{\text{Ti}^{3+}}(81 \text{ К}) = 0,36\mu_B$<br>Металлическая проводимость при $T > 100 \text{ К}$ | [59]       |
| Ce <sub>2</sub> Zn <sub>3</sub> · (NO <sub>3</sub> ) <sub>12</sub> · 24H <sub>2</sub> O | Тригональная                                  | —                                                                                                                               | 0,0063    | —                                                                                                                                                         | [17]       |
| Pr                                                                                      | Гексагональная $D_{6h}^4$                     | —                                                                                                                               | 23—35     | Чистые монокристаллические образцы не имеют четкой магнитной структуры                                                                                    | [3]        |
| PrAg                                                                                    | Кубическая $O_h^1$                            | C-тип МП (2a, 2b, c)                                                                                                            | 11—14     | $\mu_{\text{Pr}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,1\mu_B$                                                                                                          | [3]        |
| PrMg                                                                                    | Кубическая $O_h^1$                            | —                                                                                                                               | 45—47     | $\theta = -10 \text{ К}$ , $p = 3,4$                                                                                                                      | [13]       |
| PrC <sub>2</sub>                                                                        | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                  | I тип МП<br>$\mu \parallel C$                                                                                                   | 15        | $\mu_{\text{Pr}}(4,2 \text{ К}) = 1,14\mu_B$                                                                                                              | [3]        |
| PrCl <sub>3</sub>                                                                       | Гексагональная                                | —                                                                                                                               | 0,7       | —                                                                                                                                                         | [17]       |
| PrSn <sub>3</sub>                                                                       | Кубическая $O_h^1$                            | A-тип МП (a, a, 2a)                                                                                                             | 8,6       | $\theta = -8 \text{ К}$                                                                                                                                   | [3]        |
| PrB <sub>6</sub>                                                                        | Кубическая                                    | —                                                                                                                               | 6,9*1     | Металл<br>$\rho(300 \text{ К}) = 15 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$                                                                              | [17]       |
| PrAlO <sub>3</sub>                                                                      | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                 | —                                                                                                                               | —         | $\theta = -100 \text{ К}$                                                                                                                                 | [17]       |
| PrCo <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>                                                       | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                  | $\mu \parallel C$                                                                                                               | 31        | $\mu_{\text{Pr}}(4,2 \text{ К}) = 3,19\mu_B$                                                                                                              | [100]      |
| Nd                                                                                      | Гексагональная                                | ФВ в плоскости, перпендикулярной C, и АФВ между плоскостями, перпендикулярными C (изменение структуры при $T = 7,5 \text{ К}$ ) | 19        | $\theta = -16 \text{ К}$<br>$\mu_{\text{Nd}}(4,2 \text{ К}) = 2\mu_B$                                                                                     | [12, 14]   |
| NdMg                                                                                    | Кубическая $O_h^1$                            | —                                                                                                                               | 48—64     | $\theta = -11 \text{ К}$ , $p = 3,7$                                                                                                                      | [13]       |
| NdAl                                                                                    | Орторомбическая $D_{2h}^{11}$                 | НКС<br>$\alpha(\mu, [a]) = 58^\circ$<br>(2a, b, c)                                                                              | 29        | $\theta = -4 \text{ К}$<br>$\mu_{\text{Nd}}(4,2 \text{ К}) = 2,7\mu_B$                                                                                    | [3]        |

\*1 Из измерений теплоемкости.

| Вещество            | Структура                                                                |                                                        | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                          | Литература |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                     | кристаллографическая                                                     | магнитная                                              |           |                                                                                                                  |            |
| NdP                 | Кубическая $O_h^5$                                                       | I тип МП<br>$\mu \parallel [100]$                      | —         | $\mu_{Nd^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 1,8\mu_B$                                                                        | [3]        |
| NdS                 | Кубическая $O_h^5$                                                       | НКС<br>$\alpha(\mu, [111]) = 24^\circ$                 | —         | $\theta = -24 \text{ К}, p = 3,62$                                                                               | [3, 17]    |
| NdAs                | Кубическая $O_h^5$                                                       | I тип МП<br>$\mu \parallel [100]$                      | —         | $\mu_{Nd^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,13\mu_B$                                                                       | [3]        |
| NdSe                | Кубическая $O_h^5$                                                       | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a, 2a, 2a$ ) | 14        | $\theta = -9 \text{ К}, p = 3,5$<br>$\mu_{Nd}(4,2 \text{ К}) = 1,57\mu_B$                                        | [3, 17]    |
| NdAg                | Кубическая $O_h^1$                                                       | —                                                      | 22        | $\theta = -3 \text{ К}, p = 3,6$                                                                                 | [13]       |
| NdIn                | Кубическая $O_h^1$                                                       | —                                                      | 66—148    | $\theta = 35 \text{ К}, p = 3,3$                                                                                 | [13]       |
| NdTe                | Кубическая $O_h^5$                                                       | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a, 2a, 2a$ ) | 13        | $\theta = -14 \text{ К}, p = 9,8$<br>$\mu_{Nd}(4,2 \text{ К}) = 1,1\mu_B$                                        | [3, 17]    |
| NdSb                | Кубическая $O_h^5$<br>(тетрагональные искажения при низких температурах) | —                                                      | 10—16     | $\theta = -3 \text{ К}, p = 3,75$<br>$\mu_0 H_c = 10,5 \text{ Тл}$<br>$\mu_{Nd^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 2,99\mu_B$ | [3, 17]    |
| NdBi                | Кубическая $O_h^5$                                                       | I тип МП<br>$\mu \parallel [001]$                      | 25        | $\theta = -1 \text{ К}, p = 3,58$                                                                                | [3, 17]    |
| NdC <sub>2</sub>    | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                                             | I тип МП<br>$\mu \parallel C$                          | 29        | $\mu_{Nd}(4,2 \text{ К}) = 2,95\mu_B$                                                                            | [3]        |
| NdCl <sub>3</sub>   | Гексагональная                                                           | —                                                      | 1,035     | —                                                                                                                | [17]       |
| NdI <sub>3</sub>    | Кубическая $O_h^1$                                                       | C-тип МП<br>( $2a, 2a, a$ )                            | 7         | $\theta = -17 \text{ К}, p = 3,7$<br>$\mu_{Nd} = 2,1\mu_B$                                                       | [3, 13]    |
| NdSn <sub>3</sub>   | Кубическая $O_h^1$                                                       | A-тип МП<br>( $a, a, 2a$ )                             | 4,7       | $\theta = -22 \text{ К}, p = 3,6$<br>$\mu_{Nd} = 1,53\mu_B$                                                      | [3, 13]    |
| NdPb <sub>3</sub>   | Кубическая $O_h^1$                                                       | —                                                      | 2,7       | $\theta = -23 \text{ К}, p = 3,6$                                                                                | [13]       |
| Nd(OH) <sub>3</sub> | Гексагональная $C_{6h}^2$                                                | $\mu \parallel C$                                      | 1,7*1     | —                                                                                                                | [17]       |
| NdVO <sub>3</sub>   | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                                            | $C_x$ -тип МП                                          | 132       | $p = 3,32$                                                                                                       | [3]        |

\*1  $T_N = 0,265 \text{ К} [101]$ .

| Вещество                          | Структура                                                                         |                                                              | $T_N$ , К    | Дополнительные сведения                                                                         | Литература  |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                   | кристаллографическая                                                              | магнитная                                                    |              |                                                                                                 |             |
| NdFe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$                                                      | КС                                                           | 16           | Слабый ферромагнетик при $T_N < T < T_C \approx 690$ К<br>$\mu_{Nd} = 3,1\mu_B$                 | [3]         |
| NdRh <sub>4</sub> B <sub>4</sub>  | Тетрагональная (кристаллическая структура типа CeCo <sub>4</sub> B <sub>4</sub> ) | —                                                            | 1,31         | $\theta = -6,2$ , $p = 3,58$<br>Сверхпроводник при $T < 5,4$ К                                  | [102]       |
| Sm                                | Ромбоэдрическая                                                                   | $\mu \parallel C$<br>(изменение структуры при $T = 14$ К)    | 106          | $\mu_{Sm} = 0,1\mu_B$                                                                           | [12, 14]    |
| SmCl <sub>3</sub>                 | Гексагональная                                                                    | —                                                            | 0,4          | —                                                                                               | [17]        |
| SmRh <sub>4</sub> B <sub>4</sub>  | Тетрагональная (кристаллическая структура типа CeCo <sub>4</sub> B <sub>4</sub> ) | —                                                            | 0,87         | $\theta = -1,93$ К, $p = 0,63$<br>Сверхпроводник при $T < 2,72$ К, $\mu_0 H_{c2}(0) = 0,185$ Тл |             |
| Eu                                | Кубическая $O_h^9$                                                                | ГС<br>$k_0 \parallel [100]$                                  | 87—91        | $p = 8$<br>$\mu_{Eu}(4,2 \text{ К}) = 5,9\mu_B$                                                 | [3, 12, 14] |
| EuSe                              | Кубическая $O_h^5$                                                                | НКС                                                          | 4,6          | Полупроводник, ферромагнетик при $T < 2,8$ К                                                    | [3, 17]     |
| EuTe*1                            | Кубическая $O_h^5$                                                                | II тип МП<br>$\mu \parallel [110]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ ) | 8—11         | $\theta = -7,5$ К<br>$\mu_0 H_c = 7,5$ Тл<br>$n_s = 7$                                          | [17]        |
| EuF <sub>2</sub>                  | Кубическая $O_h^5$                                                                | —                                                            | 2;<br>19,5*2 | —                                                                                               | [17]        |
| Eu <sub>3</sub> O <sub>4</sub>    | Орторомбическая                                                                   | —                                                            | 5,3          | $\mu_0 H_c = 0,2$ Тл                                                                            | [17]        |
| EuTiO <sub>3</sub>                | Кубическая                                                                        | —                                                            | 5,2          | $\mu_0 H_c = 1,4$ Тл<br>$n_s = 6,93$                                                            | [17]        |
| EuGd <sub>2</sub> O <sub>4</sub>  | Орторомбическая                                                                   | —                                                            | 4,5          | —                                                                                               | [17]        |
| GdP                               | Кубическая                                                                        | —                                                            | 15           | $\theta = -2$ К<br>$\mu_0 H_c = 7,5$ Тл                                                         | [17]        |
| GdS                               | Кубическая $O_h^5$                                                                | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ ) | 50           | —                                                                                               | [3, 17]     |
| GdCu                              | Кубическая $O_h^1$                                                                | —                                                            | 41—140       | $\theta = -75 \div -26$ К,<br>$p = 8,4$                                                         | [13, 17]    |

\*1 Магнитные свойства образцов EuTe коррелируют с удельным электрическим сопротивлением, которое может изменяться в широких пределах ( $10^6 - 10^{-4}$  Ом·м при  $T = 300$  К).

\*2 Из измерений АФМР на образцах, содержащих примеси [104].

| Вещество                                         | Структура                                          |                                                        | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                | Литература |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                  | кристаллографическая                               | магнитная                                              |           |                                                                                                                        |            |
| GdAs                                             | Кубическая (тригональные искажения при $T < T_N$ ) | —                                                      | 19—25     | $\theta = -12$ К, $p = 8,2$<br>$\mu_0 H_c = 18,0$ Тл<br>$n_s = 7,2$                                                    | [17]       |
| GdSe                                             | Кубическая $O_h^5$                                 | II тип МП<br>$\mu \parallel (111)$<br>( $2a, 2a, 2a$ ) | 60        | —                                                                                                                      | [3, 17]    |
| GdAg                                             | Кубическая $O_h^1$                                 | —                                                      | 138—150   | $\theta = -84 \div -70$ К, $p =$<br>$= 8,2 \div 8,8$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 40 \cdot 10^{-3}$<br>см <sup>3</sup> /моль | [13, 17]   |
| GdIn                                             | Тетрагональная                                     | —                                                      | 28        | $\theta = -66 \div -18$ К, $p = 8,1$<br>$\chi_M(T_N)/4\pi = 73,5 \cdot 10^{-3}$<br>см <sup>3</sup> /моль               | [13, 17]   |
| GdSb                                             | Кубическая $O_h^5$                                 | II тип МП<br>$\mu \parallel (111)$<br>( $2a, 2a, 2a$ ) | 28        | $\theta = -42$ К, $p = 8,1$                                                                                            | [3, 17]    |
| GdTe                                             | Кубическая $O_h^5$                                 | —                                                      | 80        | —                                                                                                                      | [17]       |
| GdBi                                             | Кубическая $O_h^5$                                 | II тип МП<br>$\mu \parallel (111)$<br>( $2a, 2a, 2a$ ) | 28—32     | $p = 8,3$                                                                                                              | [3, 17]    |
| GdCu <sub>2</sub>                                | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$                      | —                                                      | 41        | $\theta = 11$ К, $p = 8,4$                                                                                             | [17]       |
| GdCoO <sub>3</sub>                               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                      | A-тип МП (Gd)                                          | 2,9 (Gd)  | $\mu_{Gd} = 7\mu_B$                                                                                                    | [3]        |
| GdAlO <sub>3</sub>                               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$                      | $\mu \parallel [b]$                                    | 3,87      | $\theta = -4,81$ К,<br>$\mu_0 H_{c\parallel}(0,5 \text{ К}) = 1,1$ Тл*1                                                | [17]       |
| GdVO <sub>3</sub>                                | Орторомбическая                                    | —                                                      | 7,5       | $p = 8,0$                                                                                                              | [17]       |
| GdVO <sub>4</sub>                                | Тетрагональная $D_{4h}^{19}$                       | —                                                      | 2,49      | При комнатной температуре обладает ферромагнитными свойствами                                                          | [105]      |
| Gd(OH) <sub>3</sub>                              | Гексагональная                                     | $\mu \parallel C$                                      | 2,0       | —                                                                                                                      | [17]       |
| Gd <sub>1,2</sub> Mo <sub>6</sub> S <sub>8</sub> | Ромбоэдрическая                                    | —                                                      | 0,8—0,9   | Сверхпроводник при $T < 1,4$ К                                                                                         | [108, 109] |
| SrGd <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                 | Орторомбическая                                    | —                                                      | 2,8       | $\theta = -6$ К                                                                                                        | [17]       |
| GdCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O             | —                                                  | —                                                      | 0,182*2   | —                                                                                                                      | [17]       |

\*1 Поле опрокидывания подрешеток.

\*2 Из измерений теплоемкости.

| Вещество          | Структура                     |                                                                                | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                | Литература |
|-------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                   | кристаллографическая          | магнитная                                                                      |           |                                                                                                                                        |            |
| Tb                | Гексагональная $D_{6h}^4$     | ГС при $216 \text{ К} < T < T_N$<br>$\mu \perp C$                              | 229—230   | Ферромагнетик при $T < 216 \text{ К}$                                                                                                  | [3, 12]    |
| TbAl              | Орторомбическая $D_{2h}^{11}$ | НКС<br>( $2a$ , $b$ , $c$ )                                                    | 72        | $\theta = 10 \div 24 \text{ К}$ , $p = 10$<br>$\mu_{\text{Tb}}(4,2 \text{ К}) = 8,8 \mu_B$                                             | [3, 13]    |
| TbP               | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                   |           | $\theta = 1 \text{ К}$ , $p = 9,2$ , $n_s = 8$<br>$\mu_0 H_c = 0,43 \text{ Тл}$<br>$\mu_{\text{Tb}^{3+}} = 6,2 \mu_B$                  | [3, 17]    |
| TbCu              | Кубическая $O_h^1$            | С-тип МП<br>$\mu \parallel (001)$<br>( $2a$ , $2a$ , $a$ )                     | 177       | $\theta = -20 \text{ К}$ , $p = 9,6$<br>$\mu_{\text{Tb}} = 8,6 \mu_B$                                                                  | [3, 13]    |
| TbAs              | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                   | 10—12     | $\theta = -4 \text{ К}$ , $p = 9,7$<br>$n_s = 7,9$<br>$\mu_0 H_c = 2,8 \text{ Тл}$                                                     | [3, 17]    |
| TbSe              | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$                                             | 52        | $\theta = -53,5 \text{ К}$ , $p = 9,8$<br>$\mu_{\text{Tb}}(4,2 \text{ К}) = 7,5 \mu_B$                                                 | [3]        |
| TbAg              | Кубическая $O_h^1$            | С-тип МП<br>$\mu \parallel [001]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                    | 100—106   | $\theta = -36 \div -11 \text{ К}$<br>$p = 9,4 \div 10,1$<br>$\mu_{\text{Tb}} = 8,3 \mu_B$                                              | [3, 13]    |
| TbSb              | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                   | 14—17     | $\theta = -14 \text{ К}$ , $p = 9,7$<br>$n_s = 7,5$<br>$\mu_0 H_c = 6,0 \text{ Тл}$<br>$\mu_{\text{Tb}^{3+}}(0 \text{ К}) = 8,2 \mu_B$ | [3, 17]    |
| TbBi              | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \parallel [111]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                   | 18        | $\theta = -33 \text{ К}$ , $p = 9,52$<br>$\mu_{\text{Tb}}(4,2 \text{ К}) = 7,9 \mu_B$                                                  | [3, 17]    |
| TbD <sub>2</sub>  | Кубическая $O_h^5$            | $\mu \parallel [001]^*1$                                                       | 40        | $\mu_{\text{Tb}}(4,2 \text{ К}) = 7,9 \mu_B$                                                                                           | [3]        |
| TbC <sub>2</sub>  | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | ГС, $k_0 \parallel [a]$<br>(изменение структуры при $T \approx 30 \text{ К}$ ) | 66        | $\mu_{\text{Tb}}(4,2 \text{ К}) = 5,2 \mu_B$                                                                                           | [3]        |
| TbO <sub>2</sub>  | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \parallel (111)$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                   | 3         | $p = 7,8$<br>$\mu_{\text{Tb}^{3+}} = 6,25 \mu_B$                                                                                       | [3]        |
| TbCu <sub>2</sub> | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$ | —                                                                              | 54        | $\theta = -6 \text{ К}$ , $p = 9,8$                                                                                                    | [13, 17]   |
| TbAg <sub>2</sub> | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | ФВ в (100)<br>АФВ между (100)<br>( $2a$ , $2a$ , $c$ )                         | 35        | $\theta = -32 \text{ К}$ , $n_s = 8,95$                                                                                                | [3, 13]    |

\*1 Соизмеримая СВ, распространяющаяся вдоль [001] с периодом  $\tau = 2,4 \text{ нм}$ .

| Вещество                                         | Структура                     |                                                                                                           | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                   | Литература      |
|--------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                                                  | кристаллографическая          | магнитная                                                                                                 |           |                                                                                                                           |                 |
| TbZn <sub>2</sub>                                | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$ | НКС при $T_{II} < T < T_N$<br>КС при $T < T_{II} = 60$ К* <sup>1</sup><br>$\mu \parallel [b], (a, b, 2c)$ | 75        | $\mu_{Tb} (4,2 \text{ К}) = 8,8 \mu_B$                                                                                    | [3]             |
| TbAu <sub>2</sub>                                | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C$ при $T < T_{II} = 42$ К* <sup>2</sup>                                                   | 55        | $\theta = -21 \text{ К}, p = 9,8$<br>$\mu_{Tb^{3+}} (4,2 \text{ К}) = 9 \mu_B$<br>$\mu_{Tb} (42,6 \text{ К}) = 5,1 \mu_B$ | [3, 13]         |
| TbPt <sub>3</sub>                                | Кубическая $O_h^1$            | ФВ в (111)<br>АФВ между (111)<br>(2a, a, a)                                                               | 20—22     | $\theta = 17 \text{ К}, p = 9,9$<br>$n_s = 8,4$                                                                           | [3, 13]         |
| $\alpha$ -Tb <sub>2</sub> C <sub>3</sub>         | Кубическая $T_d^6$            | $\mu \parallel [001]$                                                                                     | 33        | $\mu_{Tb} (4,2 \text{ К}) = 6,9 \mu_B$<br>$n_s = 9$                                                                       | [3]             |
| Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | —                             | —                                                                                                         | 2,4       | $\theta = -13 \text{ К}, p = 9,67$                                                                                        | [17, 108]       |
| Tb <sub>3</sub> Ni                               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>(2a, b, c)                                                                                         | 62        | $\theta = -5 \text{ К}, p = 10$                                                                                           | [3, 13]         |
| Tb <sub>3</sub> Nd                               | Тригональная $D_{3d}^5$       | $\mu \perp C$                                                                                             | 129       | Ферромагнетик при низких температурах                                                                                     | [3]             |
| Tb <sub>4</sub> La                               | Тригональная $D_{3d}^5$       | $\mu \perp C$                                                                                             | 124       | $\mu_{Tb} = 6,8 \mu_B$                                                                                                    | [3]             |
| Tb <sub>4</sub> Pr                               | Тригональная $D_{3d}^5$       | $\mu \perp C$                                                                                             | 130       | Ферромагнетик при $T < 30 \text{ К}$                                                                                      | [3]             |
| TbOCl                                            | Тетрагональная $D_{4h}^7$     | (2 $\sqrt{2} a, 2 \sqrt{2} a, 4 c$ )                                                                      |           | $p = 9,84$                                                                                                                | [3]             |
| TbAlO <sub>3</sub>                               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>$\alpha (\mu, [a]) = 34^\circ$                                                                     | 3—5       | $\mu_{Tb} (1,5 \text{ К}) = 8,25 \mu_B$                                                                                   | [3]             |
| TbVO <sub>3</sub>                                | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | КС (V)<br>НКС (Tb)                                                                                        |           | $\mu_{Tb} (1,5 \text{ К}) = 7,6 \mu_B$<br>$\mu_V (4,2 \text{ К}) = 1,3 \mu_B$                                             | [3]             |
| TbCoO <sub>3</sub>                               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>$\alpha (\mu, [a]) = 33^\circ$                                                                     | 3,3       | $\mu_{Tb} (1,5 \text{ К}) = 8,0 \mu_B$                                                                                    | [3]             |
| BaTbO <sub>3</sub>                               | Тригональная $D_{3d}^5$       | КС                                                                                                        | 36        | $\mu_{Tb} (11 \text{ К}) = 6,7 \mu_B$                                                                                     | [3]             |
| TbCo <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>                | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | КС, $\mu \parallel C$                                                                                     | 46        | $\mu_{Tb} (4,2 \text{ К}) = 9,12 \mu_B$                                                                                   | [100]           |
| Tb <sub>1,2</sub> Mo <sub>6</sub> S <sub>8</sub> | Ромбоэдрическая               | —                                                                                                         | 1,0       | Сверхпроводник при $T < 2,05 \text{ К}$<br>Ферромагнетик при $H > H_{c2}(0)$<br>$\mu_0 H_{c2}(0) = 0,19 \text{ Тл}$       | [106, 107, 109] |

\*<sup>1</sup>  $T_{II} = 55 \text{ К}$  [13]\*<sup>2</sup> При  $T_{II} < T < T_N$  несоизмеримая СВ, поляризованная вдоль оси [c] и распространяющаяся вдоль оси [a].

| Вещество                                        | Структура                     |                                                                                                      | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                 | Литература  |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                                 | кристаллографическая          | магнитная                                                                                            |           |                                                                                                         |             |
| Tb <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S                | Тригональная $D_{3d}^3$       | $\mu \parallel [110]$<br>( $a$ , $2a$ , $2c$ )                                                       | —         | $\theta = -17$ К, $\mu_{Tb}$ (1,5 К) =<br>= $8,36 \mu_B$                                                | [3]         |
| Tb <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Se               | Тригональная $D_{3d}^3$       | $\alpha(\mu, C) \approx 30^\circ$<br>( $a$ , $2a$ , $2c$ )                                           | 7         | $\theta = -18$ К, $\mu_{Tb^{3+}}$ (1,5 К) =<br>= $6,5 \mu_B$                                            | [3]         |
| Tb <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> | Кубическая $O_h^{10}$         | НКС                                                                                                  | 1,5       | —                                                                                                       | [11, 17]    |
| Dy                                              | Гексагональная $D_{6h}^4$     | ГС при $T_c < T < T_N$<br>$T_c = 85 \div 90$<br>$\mu \perp C$                                        | 175—184   | $\theta = 153$ К<br>Ферромагнетик при $T < T_c$                                                         | [3, 12, 14] |
| DyP                                             | Кубическая $O_h^5$            | НКС<br>при $T = 1,8$ К                                                                               |           | $\theta = 6$ К, $p = 9,9$<br>$n_s = 7,8$<br>$\mu_0 H_c = 1,7$ Тл                                        | [17]        |
| DyCu                                            | Кубическая $O_h^9$            | а) КС, С-тип МП*1<br>$\mu \parallel [001]$<br>б) НКС*1                                               | 61—64     | $\theta = -26 \div -18$ К, $p = 10,7$<br>$\mu_{Dy^{3+}} = 10,6 \mu_B$                                   | [3, 13]     |
| DyAs                                            | —                             | —                                                                                                    | 8,5       | $\theta = 2$ К, $p = 10,4$<br>$n_s = 8,1$<br>$\mu_0 H_c = 3,2$ Тл                                       | [17]        |
| DySb                                            | Кубическая $O_h^5$            | ФВ в (111)<br>АФВ между (111)<br>$\mu \parallel [001]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                     | 9,5       | $\theta = -4$ К, $p = 10,7$<br>$n_s = 7,7$<br>$\mu_0 H_c = 1,95$ Тл<br>$\mu_{Dy}$ (5,8 К) = $9,4 \mu_B$ | [3, 17]     |
| DyBi                                            | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                                                                  | 12—13     | $\theta = -30$<br>$\mu_{Dy}$ (4,2 К) = $8,7 \mu_B$                                                      | [3, 17]     |
| DyC <sub>2</sub>                                | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel C^{*2}$                                                                               | 59        | $\mu_{Dy}$ (4,2 К) = $8,37 \mu_B$<br>$n_s = 11,8$                                                       | [3]         |
| DyCu <sub>2</sub>                               | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$ | —                                                                                                    | 24        | $\theta = 5$ К, $p = 10,75$                                                                             | [13, 17]    |
| DyGa <sub>2</sub>                               | Гексагональная $D_{6h}^1$     | КС, $\mu \parallel [b]$<br>( $a$ , $a$ , $2\sqrt{3}c$ )                                              | 15        | $\theta = -6$ К, $p = 10,7$<br>$\mu_{Dy}$ (4,2 К) = $7,5 \mu_B$                                         | [3, 13]     |
| DyAg <sub>2</sub>                               | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | При $T_N > T > T_{II} = 9$ К<br>несоизмеримая структура*2,<br>при $T < T_{II}$ соизмеримая структура | 15        | $\theta = -25$ К, $p = 10,5$<br>$\mu_0 H_c \parallel = 3,5$ Тл*3<br>$\mu_{Dy}$ (1,7 К) = $7,4 \mu_B$    | [3, 13, 17] |

\*1 Возможные структуры.

\*2 Несоизмеримая поперечная СВ, распространяющаяся вдоль оси  $[a]$ .

\*3 Поле опрокидывания подрешеток.



| Вещество                                         | Структура                     |                                                                                                              | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                                                                                  | Литература      |
|--------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                                                  | кристаллографическая          | магнитная                                                                                                    |           |                                                                                                                                                                          |                 |
| DyAu <sub>2</sub>                                | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | При $T_N > T > T_{II} = 25$ К несоизмеримая структура* <sup>1</sup> , при $T < T_{II}$ соизмеримая структура | —         | $\theta = -13 \div -24$ К, $p = 10,5$<br>$\mu_{Dy}(1,7 \text{ К}) = 9,2\mu_B$                                                                                            | [3, 13, 17]     |
| DyIn <sub>3</sub>                                | Кубическая $O_h^1$            | ФВ в (110)<br>АФВ между (110)<br>$\alpha(\mu, [001]) = 27,5^\circ$<br>( $a, a, 2a$ )                         | 23—24     | $\theta = -35$ К, $p = 10,8$<br>$\mu_{Dy}(4,2 \text{ К}) = 8,8\mu_B$                                                                                                     | [3, 13]         |
| DyPt <sub>3</sub>                                | Кубическая $O_h^1$            | II тип МП<br>( $2a, 2a, 2a$ )                                                                                | 13        | $\mu_{Dy} = 9,0\mu_B$                                                                                                                                                    | [3, 13]         |
| DyB <sub>6</sub>                                 | Кубическая (О.Ц.К.)           | —                                                                                                            | 20,5      | $\theta = -21$ К, $p = 9,43$                                                                                                                                             | [110]           |
| DyOON                                            | Моноклинная $C_{2h}^2$        | ФВ в (010)<br>АФВ между (010)<br>$\mu \parallel (010)$<br>$\alpha(\mu, [a]) = 80^\circ$                      | —         | $\mu_{Dy^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 9,4\mu_B$                                                                                                                                | [3]             |
| DyOCl                                            | Тетрагональная $D_{4h}^7$     | $\mu \parallel (001)$<br>( $a, a, 2c$ )                                                                      | 9         | $\mu_0 H_c(4,2 \text{ К}) = 1,4$ Тл                                                                                                                                      | [3, 17]         |
| DyAlO <sub>3</sub>                               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>$\alpha(\mu, [a]) = 57^\circ$                                                                         | 3,4—3,5   | $\mu_{Dy}(1,5 \text{ К}) = 8,2\mu_B$                                                                                                                                     | [3, 17]         |
| DyCoO <sub>3</sub>                               | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\alpha(\mu, [a]) = 60^\circ$                                                                                | 3,6       | Ионы Со диамагнитны из-за сильного кристаллического поля; $\mu_{Dy}(1,5 \text{ К}) = 8,8\mu_B$                                                                           | [3]             |
| DyPO <sub>4</sub>                                | Тетрагональная $D_{4h}^{19}$  | G-тип МП<br>$\mu \parallel C$                                                                                | 3,4       | Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 3$<br>$\mu_{Dy^{3+}}(1,8 \text{ К}) = 9,0\mu_B$                                                                     | [3, 111]        |
| DyVO <sub>4</sub>                                | Тетрагональная $D_{4h}^{19}$  | $\mu \parallel [b]$                                                                                          | 3,0       | $\mu_{Dy}(1,85 \text{ К}) = 9,0\mu_B$                                                                                                                                    | [3, 17]         |
| DyAsO <sub>4</sub>                               | Тетрагональная $D_{4h}^{19}$  | НКС<br>$\mu \parallel (007)$                                                                                 | 2,5—2,8   | Ферромагнетик при $T < T_C = 11$ К                                                                                                                                       | [3]             |
| Dy <sub>1,2</sub> Mo <sub>6</sub> S <sub>8</sub> | Ромбоэдрическая               | $\mu \parallel [111]$                                                                                        | 0,4       | Сверхпроводник при $T < 2,05$ К<br>$\mu_0 H_{c2}(0) = 0,12$ Тл<br>Ферромагнитная компонента при $\mu_0 H > 2 \cdot 10^{-2}$ Тл<br>$\mu_{Dy}(0,07 \text{ К}) = 8,77\mu_B$ | [107, 109, 112] |

\*<sup>1</sup> Несоизмеримая поперечная СВ, распространяющаяся вдоль оси [a].

| Вещество                                        | Структура                     |                                                              | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                            | Литература  |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                                 | кристаллографическая          | магнитная                                                    |           |                                                                                                    |             |
| Dy <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S                | Тригональная $D_{3d}^3$       | $\mu \parallel [110]$<br>( $a$ , $2a$ , $2c$ )               | 5,85      | $\theta = -14,8$ К<br>$\mu_{Dy}(1,5 \text{ К}) = 4,41\mu_B$                                        | [3]         |
| Dy <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Se               | Тригональная $D_{3d}^3$       | $\mu \parallel C$<br>( $a$ , $2a$ , $2c$ )                   | 8,5       | $\mu_{Dy^{2+}}(1,5 \text{ К}) = 9,0\mu_B$                                                          | [3]         |
| Dy <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> | Кубическая $O_h^{10}$         | НКС*1                                                        | 2,5       | $\mu_{Dy^{2+}}(1,3 \text{ К}) = 9,0\mu_B$                                                          | [3, 11, 17] |
| Ho                                              | Гексагональная $D_{6h}^4$     | ГС, $k_0 \parallel C$ при $T_N > T > T_C = 20$ К             | 130—133   | При $T < T_C$ ферромагнитная спираль                                                               | [3, 12, 14] |
| HoSi                                            | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | КС, $\mu \parallel [103]$<br>( $2a$ , $b$ , $2c$ )           | 25        | $\theta = 2$ К, $p = 10,6$<br>$\mu_{Ho^{2+}}(4,2 \text{ К}) = 7,0\mu_B$                            | [3, 13]     |
| HoAs                                            | —                             | —                                                            | 4,8       | $\theta = 1$ К, $p = 10,5$<br>$n_s = 9,0$<br>$\mu_0 H_{c1} = 0,18$ Тл<br>$\mu_0 H_{c2} = 0,6$ Тл   | [17]        |
| HoRh                                            | Кубическая $O_h^1$            | А-тип МП<br>$\mu \parallel (001)$                            | 3,2       | $\theta = -3$ К, $p = 10,4$<br>$\mu_{Ho}(1,2 \text{ К}) = 5,2\mu_B$                                | [3]         |
| HoSb                                            | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \parallel [100]$<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ ) | 5—9       | $\theta = -2,4$ К, $p = 10,8$<br>$n_s = 8,7$ ; $\mu_0 H_c = 1,5$ Тл,<br>$\mu_{Ho^{2+}} = 9,3\mu_B$ | [3, 17]     |
| HoD <sub>2</sub>                                | Кубическая $O_h^5$            | НКС                                                          | 8         | $p = 9,9$                                                                                          | [3]         |
| HoC <sub>2</sub>                                | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | ГС, $k_0 \parallel [a]$                                      | 26        | $\mu_{Ho}(4,2 \text{ К}) = 6,89\mu_B$                                                              | [3]         |
| HoCu <sub>2</sub>                               | Ортогональная $D_{2h}^{28}$   | —                                                            | 9         | $\theta = -6$ К, $p = 10,5$                                                                        | [13, 17]    |
| HoGa <sub>2</sub>                               | Гексагональная $D_{6h}^1$     | КС, $\mu \parallel a$<br>( $2a$ , $\sqrt{3}a$ , $c$ )        | 10        | $\theta = -2$ К, $p = 10,7$<br>$\mu_{Ho}(4,2 \text{ К}) = 9,5\mu_B$                                | [3, 13]     |
| HoAg <sub>2</sub>                               | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | Несоизмеримая СВ*2, распространяющаяся вдоль оси $[a]$       | 5—8       | $\theta = -13,5$ К                                                                                 | [3, 13]     |
| HoAu <sub>2</sub>                               | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | НКС                                                          | 9         | $\theta = -8,0$ К, $p = 10,97$                                                                     | [3, 13]     |

\*1 Магнитная структура представляет собой три группы взаимно ортогональных вложенных друг в друга магнитных подрешеток, направленных вдоль или против осей  $[100]$ ,  $[010]$  и  $[001]$ .

\*2 При  $T > T_H = 4,7$  К продольная поляризация, при  $T < T_H$  поперечная поляризация, параллельная оси  $C$ .

| Вещество                                 | Структура                     |                                                                                                                     | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                                       | Литература     |
|------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|                                          | кристаллографическая          | магнитная                                                                                                           |           |                                                                                                               |                |
| HoIn <sub>3</sub>                        | Кубическая $O_h^1$            | ФВ в (110)<br>АФВ между (110)<br>(2a, a, 2a)                                                                        | 11        | $\theta = -18$ К, $p = 10,65$<br>$\mu_{\text{Ho}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 9\mu_B$                               | [3, 13]        |
| $\alpha$ -Ho <sub>2</sub> C <sub>3</sub> | Кубическая $T_d^6$            | $\mu \parallel [111]$                                                                                               | 19        | $p = 8,7$<br>$\mu_{\text{Ho}} = 7,3\mu_B$                                                                     | [3]            |
| HoCoO <sub>3</sub>                       | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>$\alpha(\mu, [a]) = \pm 63^\circ$                                                                            | 2,4       | Ионы Co диамагнитны из-за<br>сильного кристаллического<br>поля<br>$\mu_{\text{Ho}}(1,5 \text{ К}) = 7,0\mu_B$ | [3]            |
| Ho <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S         | Тригональная $D_{3d}^3$       | КС, $\mu \parallel C$<br>(a, 2a, c)                                                                                 | 2,5       | $\theta = -8$ К<br>$\mu_{\text{Ho}}(1,5 \text{ К}) = 7,9\mu_B$                                                | [3]            |
| Ho <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Se        | Тригональная $D_{3d}^3$       | КС, $\mu \parallel C$<br>(a $\sqrt{3}$ , a, c)                                                                      | 4         | $\mu_{\text{Ho}}(1,5 \text{ К}) = 9,3\mu_B$                                                                   | [3]            |
| Er                                       | Гексагональная $D_{6h}^4$     | При $T > 52 \text{ К}^{*1}$ $\mu \parallel C$ ,<br>при $20 < T < 52 \text{ К}$<br>$\mu \parallel C$ и $\mu \perp C$ | 79—86     | При $T < T_C = 20 \text{ К}$ фер-<br>ромагнитная спираль                                                      | [3, 12,<br>14] |
| ErAl                                     | Орторомбическая $D_{2h}^{11}$ | НКС<br>(a, 2b, c)                                                                                                   | 10—13     | $\theta = 25$ К, $p = 9,7$<br>$\mu_{\text{Er}}(4,2 \text{ К}) = 7,0\mu_B$                                     | [3, 13]        |
| ErSi                                     | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | КС<br>(2a, b, 2c)                                                                                                   | 10        | $\theta = -5$ К, $p = 9,38$<br>$\mu_{\text{Er}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 6,2\mu_B$                               | [3]            |
| ErP                                      | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП<br>$\mu \perp [111]$                                                                                      | 3—4       | $\theta \approx 0$ К, $p = 9,3$<br>$n_s = 8,5$ , $\mu_0 H_c = 0,52$ Тл<br>$\mu_{\text{Er}} = 5,7\mu_B$        | [3, 17]        |
| ErAs                                     | —                             | —                                                                                                                   | 3,5       | $\theta = -1,5$ К, $p = 9,6$<br>$n_s = 8,4$<br>$\mu_0 H_c = 1,05$ Тл                                          | [17]           |
| ErSb                                     | Кубическая $O_h^5$            | $\mu \perp [111]$<br>(2a, 2a, 2a)                                                                                   | 3,5—3,7   | $\theta = -3$ К, $p = 9,6$ ,<br>$n_s = 7,3$<br>$\mu_0 H_c = 1,2$ Тл<br>$\mu_{\text{Er}^{3+}} = 7\mu_B$        | [3, 17]        |
| ErRh                                     | Кубическая $O_h^1$            | A-тип МП<br>$\mu \parallel (001)$<br>(a, a, 2a)                                                                     | 3,3       | $\theta = -4$ К, $p = 9,4$<br>$\mu_{\text{Er}}(1,2 \text{ К}) = 6,1\mu_B$                                     | [3, 13]        |
| ErC <sub>2</sub>                         | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | Набор несоизмеримых СВ<br>при $T > 10 \text{ К}^{*2}$                                                               | 19        | $\mu_{\text{Er}}(2 \text{ К}) = 7,9\mu_B$                                                                     | [3]            |

\*1 При  $52 \text{ К} < T < T_N$  продольная СВ, распространяющаяся вдоль C с полупериодом семь атомных слоев; при  $T < 52 \text{ К}$  добавляется компонента намагниченности в плоскости, перпендикулярной оси C.

\*2 При  $T < 10 \text{ К}$  вклад в магнитную структуру дает соизмерная антиферромагнитная СВ.

| Вещество                | Структура                     |                                                               | $T_N$ , К         | Дополнительные сведения                                                                                                                                       | Литература   |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|                         | кристаллографическая          | магнитная                                                     |                   |                                                                                                                                                               |              |
| $\text{ErCu}_2$         | Орторомбическая $D_{2h}^{28}$ | —                                                             | 11                | $\theta = 4$ К, $p = 9,35$                                                                                                                                    | [13, 17]     |
| $\text{ErAu}_2$         | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$  | $\mu \parallel [b]^*1$                                        | 6,7               | $\theta = -4$ К, $p = 9,45$<br>$\mu_{\text{Er}} = 9,2\mu_B$                                                                                                   | [3, 13]      |
| $\alpha\text{-ErAl}_3$  | Тригональная $D_{3d}^5$       | КС, $\mu \parallel C$<br>( $2a$ , $2a$ , $c$ )                | 5—6               | $\mu_{\text{Er}^{3+}}(2,15 \text{ К}) = 6,15\mu_B$                                                                                                            | [3, 13]      |
| $\beta\text{-ErAl}_3$   | Кубическая $O_h^1$            | С-тип МП<br>$\mu \parallel (001)$<br>( $2a$ , $2a$ , $a$ )    | 5                 | $\theta = -16$ К, $p = 9,87$<br>$n_s = 6,25$<br>$\mu_{\text{Er}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 5,1\mu_B$                                                              | [3]          |
| $\text{ErIn}_3$         | Кубическая $O_h^1$            | С-тип МП<br>( $2a$ , $2a$ , $a$ )                             | 6                 | $\theta = -10$ К, $p = 9,75$<br>$n_s = 7,3$                                                                                                                   | [3, 13]      |
| $\text{Er}_2\text{O}_3$ | Кубическая $T_h^7$            | НКС                                                           | 3,4               | $\theta = -11$ К, $p = 10,5$<br>$\mu_{\text{Er}^{3+ \text{ I}}}(1,25 \text{ К}) = 6,06\mu_B$<br>$\mu_{\text{Er}^{3+ \text{ II}}}(1,25 \text{ К}) = 5,36\mu_B$ | [3, 17, 108] |
| $\text{Er}_3\text{Co}$  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>(изменение структуры<br>при $T = 7$ К)                 | 13                | $\theta = 20$ К, $\mu_{\text{Er I}} =$<br>$= \mu_{\text{Er II}}(4,2 \text{ К}) = 6,4\mu_B$                                                                    | [3, 13]      |
| $\text{Er}_3\text{Ni}$  | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС<br>$\alpha(\mu, [a]) = 29^\circ$<br>( $2a$ , $2b$ , $c$ ) | 5—9               | $\theta = -6$ К, $p = 9,8$<br>$\mu_{\text{Er I}} = \mu_{\text{Er II}}(4,2 \text{ К}) =$<br>$= 6,9\mu_B$<br>$\mu_{\text{Ni}}(4,2 \text{ К}) = 0$               | [3, 13]      |
| $\text{ErOOH}$          | Моноклинная $C_{2h}^2$        | КС, $\mu \parallel [b]$                                       | —                 | $\mu_{\text{Er}}(1,6 \text{ К}) = 7,14\mu_B$                                                                                                                  | [3]          |
| $\text{ErVO}_3$         | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | $\mu_V \parallel [b]$<br>$\mu_{\text{Er}} \parallel [c]$      | 20 (V)<br>16 (Er) | $\mu_V(4,2 \text{ К}) = 1,2\mu_B$<br>$\mu_{\text{Er}}(4,2 \text{ К}) = 4,25\mu_B$                                                                             | [3]          |
| $\text{LaErO}_3$        | Орторомбическая $D_{2h}^{16}$ | НКС                                                           | 2,4               | $p = 9,45$<br>$\mu_{\text{Er}}(1,5 \text{ К}) = 6,34\mu_B$                                                                                                    | [3]          |
| Tm                      | Гексагональная $D_{6h}^4$     | $\mu \parallel C$ при $40 \text{ К} < T < T_N^{*2}$           | 56                | При $T \leq T_C = 40$ К<br>ферромагнитное упорядо-<br>чение                                                                                                   | [12, 14]     |
| TmAl                    | Орторомбическая $D_{2h}^{11}$ | НКС<br>( $2a$ , $b$ , $c$ )                                   | 11                | $\theta = -2$ К, $\mu_{\text{Tm I}} =$<br>$= \mu_{\text{Tm II}}(4,2 \text{ К}) = 5,5\mu_B$                                                                    | [3]          |
| TmSi                    | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | КС<br>( $a$ , $b$ , $2c$ )                                    | 10                | $\theta = 10$ К, $p = 7,45$<br>$\mu_{\text{Tm}^{3+}}(4,2 \text{ К}) = 5,0\mu_B$                                                                               | [3, 13]      |

\*1 Несоизмеримая поперечная СВ, распространяющаяся вдоль оси  $[a]$ ; при  $T < 4$  К добавляется соизмеримая антиферромагнитная СВ.

\*2 При  $T_C < T < T_N$  продольная СВ, распространяющаяся вдоль оси  $C$  с полупериодом семь атомных слоев.

| Вещество                                          | Структура                    |                                                                      | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                                 | Литература      |
|---------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                                                   | кристаллографическая         | магнитная                                                            |           |                                                                                         |                 |
| TmAu <sub>2</sub>                                 | Тетрагональная $D_{4h}^{17}$ | —                                                                    | 3,2—3,5   | $p = 7,62$                                                                              | [3, 13]         |
| Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | Кубическая $T_h^7$           | НКС<br>$\mu_{Yb I} \parallel [111]$<br>$\mu_{Yb II} \parallel [101]$ | 2,3       | $\mu_{Yb I} (1,25 \text{ К}) = 1,05\mu_B$<br>$\mu_{Yb II} (1,25 \text{ К}) = 1,86\mu_B$ | [3]             |
| Yb <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S                  | Тригональная $D_{3d}^3$      | КС<br>$\mu \parallel [110]$                                          | 3         | $\theta = -6,5 \text{ К}$<br>$\mu (1,5 \text{ К}) = 1,66\mu_B$                          | [3, 17]         |
| Yb <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Se                 | Тригональная $D_{3d}^3$      | КС, $\mu \perp C$                                                    | —         | $\mu_{Yb} (1,5 \text{ К}) = 1,6\mu_B$                                                   | [3]             |
| K <sub>2</sub> ReCl <sub>6</sub>                  | Кубическая $O_h^5$           | I тип МП                                                             | 12        | $\mu_{Re^{4+}} (4,2 \text{ К}) = 2,6\mu_B$<br>$n_s = 2,6$                               | [3, 17]         |
| K <sub>2</sub> ReBr <sub>6</sub>                  | Кубическая $O_h^5$           | I тип МП<br>$\mu \parallel (001)$                                    | 15,3      | —                                                                                       | [3]             |
| K <sub>2</sub> IrCl <sub>6</sub>                  | Кубическая $O_h^5$           | III тип МП<br>( $a, a, 2a$ )                                         | 3,0       | $\theta = -32 \text{ К}$                                                                | [3, 17, 113]    |
| Rb <sub>2</sub> IrCl <sub>6</sub>                 | Кубическая $O_h^5$           | —                                                                    | 1,8       | $\theta = -17 \text{ К}$                                                                | [113]           |
| Cs <sub>2</sub> IrCl <sub>6</sub>                 | Кубическая $O_h^5$           | —                                                                    | 0,5       | $\theta = -4 \text{ К}$                                                                 | [113]           |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> IrCl <sub>6</sub> | Кубическая $O_h^5$           | —                                                                    | 2,15      | $\theta = -20 \text{ К}$                                                                | [113]           |
| UN                                                | Кубическая $O_h^5$           | I тип МП                                                             | 50—55     | $\theta = -200 \div -300 \text{ К}, p=3$<br>$\mu_{U^{3+}} (4,2 \text{ К}) = 0,75\mu_B$  | [1, 3, 114]     |
| UP                                                | Кубическая $O_h^5$           | —                                                                    | 122—125   | $\theta = 49 \text{ К}, p = 3,3$                                                        | [17, 114]       |
| UGa                                               | Ромбическая                  | —                                                                    | 27        | —                                                                                       | [114]           |
| UAs                                               | Кубическая $O_h^5$           | I тип МП<br>$\mu \parallel [001]$                                    | 128       | $\theta = 32 \text{ К}, \mu_U = 1,89\mu_B$                                              | [1, 3, 17, 114] |
| USb                                               | Кубическая $O_h^5$           | I тип МП                                                             | 213—246   | $\theta = 95 \text{ К}, p = 3,85$<br>$\mu_U (4,2 \text{ К}) = 2,6\mu_B$                 | [1, 3, 114]     |
| UBi                                               | Кубическая $O_h^5$           | —                                                                    | 285—290   | $\theta = 115 \text{ К}$                                                                | [114]           |
| UO <sub>2</sub>                                   | Кубическая $O_h^5$           | $\mu \parallel [111]^*1$                                             | 28—31     | $\mu_{U^{4+}} = 1,7\mu_B$                                                               | [3, 17]         |

\*1 Наиболее вероятно неcollinearная трехлучевая магнитная структура с ориентацией магнитных моментов на атомах урана вдоль пространственных диагоналей куба [115].

| Вещество                      | Структура                 |                                                                                | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                                                       | Литература |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                               | кристаллографическая      | магнитная                                                                      |           |                                                                               |            |
| UP <sub>2</sub>               | Тетрагональная $D_{4h}^7$ | $\mu \parallel C$<br>( $a$ , $a$ , $2c$ )                                      | 203—206   | $\theta = 30$ К, $p = 2,4$<br>$\mu_U(80 \text{ К}) = 2,0\mu_B$                | [3, 17]    |
| UMn <sub>2</sub>              | Кубическая $O_h^7$        | —                                                                              | 260       | —                                                                             | [114]      |
| UAs <sub>2</sub>              | Тетрагональная $D_{4h}^7$ | $\mu \parallel C$<br>( $a$ , $a$ , $2c$ )                                      | 283       | $\theta = 34$ К, $p = 2,9$<br>$\mu_U(4,2 \text{ К}) = 1,6\mu_B$               | [3, 114]   |
| USe <sub>2</sub>              | —                         | —                                                                              | 11—13     | —                                                                             | [114]      |
| USb <sub>2</sub>              | Тетрагональная $D_{4h}^7$ | $\mu \parallel C$<br>( $a$ , $a$ , $2c$ )                                      | 206       | $\theta = 18$ К, $p = 3,0$<br>$\mu_U(80 \text{ К}) = 0,94\mu_B$               | [3, 114]   |
| UHg <sub>2</sub>              | Тетрагональная $C_{4h}^6$ | —                                                                              | 70        | —                                                                             | [114]      |
| UBi <sub>2</sub>              | Тетрагональная $D_{4h}^7$ | $\mu \parallel C$                                                              | 183       | $\theta = -53$ К, $p = 3,4$<br>$\mu_U(80 \text{ К}) = 2,1\mu_B$               | [3, 17]    |
| UGa <sub>3</sub>              | Кубическая $O_h^1$        | G-тип МП<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                                             | 70        | $\mu_U(4,2 \text{ К}) = 0,72\mu_B$                                            | [3, 114]   |
| UIn <sub>3</sub>              | Кубическая $O_h^1$        | G-тип МП<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                                             | 95—100    | $\theta = -215$ К                                                             | [3, 114]   |
| UTe <sub>3</sub>              | —                         | —                                                                              | 56        | —                                                                             | [17]       |
| UTl <sub>3</sub>              | Кубическая $O_h^1$        | G-тип МП<br>( $2a$ , $2a$ , $2a$ )                                             | 80—90     | $\theta = -150$ К, $\mu_U(4,2 \text{ К}) = 1,6\mu_B$                          | [3, 114]   |
| UPb <sub>3</sub>              | Кубическая $O_h^1$        | ФВ в (001)<br>АФВ между (001)<br>$\mu \parallel [001]$<br>( $a$ , $a$ , $2a$ ) | 32        | —                                                                             | [3, 114]   |
| UPd <sub>4</sub>              | Кубическая $O_h^1$        | КС, $\mu \parallel (001)$<br>( $2a$ , $2a$ , $a$ )                             | 10—30     | $\theta = -130$ К, $p = 3,47$<br>$\mu_U \approx 0,8\mu_B$                     | [3]        |
| UCu <sub>5</sub>              | Кубическая $T_d^2$        | КС, $\mu \perp (111)$<br>ФВ в (111)<br>АФВ между (111)                         | 15—16     | $\mu_U(4,2 \text{ К}) = 0,9\mu_B$                                             | [3, 114]   |
| U <sub>2</sub> N <sub>3</sub> | Кубическая $T_h^7$        | —                                                                              | 94—96     | —                                                                             | [114]      |
| UOS                           | Тетрагональная $D_{4h}^7$ | $\mu \parallel C$<br>( $a$ , $a$ , $2c$ )                                      | 55        | $\theta = -51$ К<br>$\mu_U(4,2 \text{ К}) = 1,9\mu_B$                         | [3]        |
| UOSe                          | Тетрагональная $D_{4h}^7$ | $\mu \parallel C$                                                              | 72        | $\theta = -20 \div -130$ К<br>$p = 2,87$<br>$\mu_U(4,2 \text{ К}) = 2,2\mu_B$ | [3]        |

| Вещество                         | Структура                     |                                                                                               | $T_N$ , К        | Дополнительные сведения                                                                        | Литература |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                  | кристаллографическая          | магнитная                                                                                     |                  |                                                                                                |            |
| UOTe                             | Тетрагональная $D_{4h}^7$     | $\mu \parallel C$                                                                             | 157—160          | $\theta = -56 \div -60$ К<br>$\mu_U (78 \text{ К}) = 2,7\mu_B$                                 | [3]        |
| U <sub>2</sub> N <sub>2</sub> P  | Тригональная $D_{3d}^3$       | КС, $\mu \parallel C$                                                                         | 366              | $\mu_U (4,2 \text{ К}) = 1,7\mu_B$                                                             | [3]        |
| U <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S  | Тригональная $D_{3d}^3$       | КС, $\mu \parallel C$                                                                         | 233              | $\mu_U (4,2 \text{ К}) = 1,3\mu_B$                                                             | [3]        |
| U <sub>2</sub> N <sub>2</sub> As | Тригональная $D_{3d}^3$       | КС, $\mu \parallel C$<br>( $a, a, 2c$ )                                                       | 406              | $\mu_U (4,2 \text{ К}) = 1,3\mu_B$                                                             | [3]        |
| U <sub>2</sub> N <sub>2</sub> Se | Тригональная $D_{3d}^3$       | КС, $\mu \parallel C$<br>( $a, a, 2c$ )                                                       | 245              | $\mu_U (4,2 \text{ К}) = 2,2\mu_B$                                                             | [3]        |
| NpC                              | Кубическая $O_h^5$            | —                                                                                             | 310              | $p = 3,37$<br>Ферромагнетик при $T < T_c = 200$ К<br>$\mu_{Np} = 1,4\mu_B^{*1}$                | [17]       |
| NpP                              | Кубическая $O_h^5$            | —                                                                                             | 130              | —                                                                                              | [114]      |
| NpS                              | Кубическая $O_h^5$            | II тип МП                                                                                     | 23 <sup>*2</sup> | $p = 2,1$<br>$\mu_{Np} (4,2 \text{ К}) = 0,9\mu_B$                                             | [3]        |
| NpAs                             | Кубическая $O_h^5$            | Продольная СВ при $T > T_{II} = 150$ К, I тип МП<br>$\mu \parallel [001]$<br>при $T < T_{II}$ | 177              | $(\mu_{Np})_{\max} = 1,4\mu_B$ при $T_{II} < T < T_N$<br>$\mu_{Np} (4,2 \text{ К}) = 2,5\mu_B$ | [3]        |
| NpSb                             | Кубическая $O_h^5$            | I тип МП                                                                                      | 207              | $\mu_{Np} (4,2 \text{ К}) = 2,5\mu_B$                                                          | [3]        |
| NpPt                             | Орторомбическая $D_{2h}^{17}$ | —                                                                                             | 27               | —                                                                                              | [114]      |
| NpO <sub>2</sub>                 | Кубическая $O_h^5$            | —                                                                                             | 25,3             | —                                                                                              | [17]       |
| NpCo <sub>2</sub>                | Кубическая $O_h^7$            | —                                                                                             | 15               | $\mu_{Np} = 0,5\mu_B$<br>$\mu_{Co} = 9,15\mu_B$                                                | [3]        |
| NpAs <sub>2</sub>                | —                             | —                                                                                             | 180              | —                                                                                              | [114]      |
| NpIr <sub>2</sub>                | Кубическая $O_h^7$            | —                                                                                             | 7,5              | —                                                                                              | [114]      |

\*1 В ферромагнитном состоянии.

\*2 При  $T = T_N$  фазовый переход первого рода.

| Вещество                | Структура            |                              | $T_N$ , К | Дополнительные сведения                     | Литература |
|-------------------------|----------------------|------------------------------|-----------|---------------------------------------------|------------|
|                         | кристаллографическая | магнитная                    |           |                                             |            |
| $\text{NpPd}_3$         | Кубическая $O_h^1$   | КС, G-тип МП<br>(2a, 2a, 2a) | 55        | $\mu_{\text{Np}}(4,2 \text{ К}) = 2,0\mu_B$ | [3, 114]   |
| $\text{NpSn}_3$         | Кубическая $O_h^1$   | —                            | 9,5       | —                                           | [114]      |
| $\text{NpB}_4$          | —                    | —                            | 52,5      | —                                           | [114]      |
| $\text{PuN}$            | Кубическая $O_h^5$   | —                            | 13        | —                                           | [114]      |
| $\text{PuRh}_3$         | Кубическая $O_h^1$   | —                            | 6,2       | —                                           | [114]      |
| $\text{PuPd}_3$         | Кубическая $O_h^1$   | —                            | 24        | —                                           | [114]      |
| $\text{PuBe}_{13}$      | Кубическая $O_h^6$   | —                            | 11,5      | —                                           | [114]      |
| $\text{Pu}_3\text{S}_4$ | Кубическая           | —                            | 10        | —                                           | [114]      |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
- Боровик-Романов А. С. Итоги науки. Физико-математические науки. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 4. Антиферромагнетизм.
- Oleś A., Kajzar M., Kucab W. e. a. Magnetic structures determined by neutron diffraction. Warszawa: Krakow państwowe wydawnictwo naukowe, 1976.
- Кричик Г. С. Физика магнитных явлений. М.: МГУ, 1985.
- Боровик-Романов А. С. Антиферромагнетики с анизотропией типа легкой плоскость//Проблемы магнетизма. М.: Наука, 1972. С. 47—58.
- Александров К. С., Федосеева Н. В., Спевак-ова И. П. Магнитные фазовые переходы в галлоидных кристаллах. Новосибирск: Наука, 1983.
- Еременко В. В. Введение в оптическую спектроскопию магнетиков. Киев: Наукова думка, 1975.
- Туров Е. А., Петров М. П. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1969.
- Изюмов Ю. А., Найш В. Е., Озеров Р. П. Нейтроны и твердое тело. М.: Атомиздат, 1981. Т. 2. Нейтронография магнетиков.
- Туров Е. А. Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
- Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах/А. К. Звездин, В. М. Матвеев, А. А. Мухин, А. И. Попов. М.: Наука, 1985. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках/К. П. Белов, А. И. Звездин, А. М. Кадомцева, Р. З. Левитин. М.: Наука, 1979.
- Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма: Пер. с яп. М.: Мир, 1983.
- Buschow K. H. J.//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam — New York — Oxford: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 297—414.
- Legvold S.//Ibid. P. 183—295.
- Keffer F.//Handbuch der Physik. Berlin. Springer, 1966. Bd 18/2. S. 1—207.
- Morrish A. H. The Physical Principles of Magnetism. N. Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1965.
- Ожогин В. И., Шапиро В. Г. Глава 30. Антиферромагнетики//Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 600—633.
- Hurd C. M.//Contemp. Phys. 1982. Vol. 23, No 5. P. 469—493.
- Bizette H., Tsai B.//Compt. Rend. 1954. Vol. 238. P. 1575—1576.
- Stout J. W., Adams H. E.//J. Amer. Chem. Soc. 1942. Vol. 64. P. 1535—1537.
- Jacobs J. S.//Appl. Phys. 1961. Vol. 32S. P. 61—64.
- Shapira Y., Foner S.//Phys. Rev. B. 1970. Vol. 1, No 7. P. 3083—3096.
- Low G. G., O Okazaki A., Stevenson R. W. H. e. a.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35, No 3. P. 998—999.
- Johnson F. M., Nethercot A. H. Jr.//Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 705—714.
- Еременко В. В., Беляева А. И.//Успехи физ. наук. 1969. Т. 98, вып. 1. С. 27—70.
- Allen S. J. Jr., Loudon R., Richards P. L.//Phys. Rev. Lett. 1966. Vol. 16. P. 463—465.
- Green R. L., Sell D. D., Yen W. M.//Ibid. 1965. Vol. 15, No 6. P. 656—659.
- Харченко Н. Ф., Еременко В. В.//Физика конденсированного состояния. Харьков: ФТИ низких температур АН УССР, 1971. Вып. XIII. С. 3—45.
- Боровик-Романов А. С.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1959. Т. 36, вып. 3. С. 766—781.



30. Ожогин В. И.//Там же. 1970. Т. 58, вып. 6(6). С. 2079—2089.
31. Боровик-Романов А. С., Прозорова Л. А.//Там же. 1968. Т. 55, вып. 5(11). С. 1727—1736.
32. Боровик-Романов А. С., Рудашевский Е. Г.//Там же. 1964. Т. 47, вып. 6(12). С. 2095—2101.
33. Боровик-Романов А. С., Крейнс Н. М., Прозорова Л. А.//Там же. 1963. Т. 45, вып. 2(8). С. 64—70.
34. Ozhogin V. I., Maximenkov P. P.//Digests of Intermag. Conf., Kyoto, 1972. P. 494; Seavey M. H.//Solid State Commun. 1972. Vol. 10. P. 219—221.
35. Боровик-Романов А. С., Крейнс Н. М., Житиков В. Г. Проблемы магнитного резонанса. М.: Наука, 1978.
36. Borovik-Romanov A. S., Prozorova L. A.//J. Phys. 1971. Vol. 32. P. C1—837.
37. Ожогин В. И., Якубовский А. Ю.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 63, вып. 6. С. 2155—2158.
38. Ozhogin V. I., Inyushkin A. V., Babushkina N. A.//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 31—34. P. 147—148.
39. Jakobs I. S., Lawrence P.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 996—999.
40. Gillot M., Eremenko V. V., Marchand A. e. a.//Proc. Intern. Symp. on High Field Magnetism, Osaka, 1982/Ed. by M. Date. Amsterdam — New York — Oxford: North-Holland Publ. Comp., 1983. P. 63—65.
41. Дзялошинский И. Е.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1957. Т. 32, вып. 6. С. 1547—1562.
42. Боровик-Романов А. С., Ожогин В. И.//Там же. 1960. Т. 39, вып. 1(7). С. 27—36.
43. Ожогин В. И.//Там же. 1963. Т. 45, вып. 5. С. 1687—1690.
44. Ожогин В. И., Шапиро В. Г.//Там же. 1968. Т. 54, вып. 1. С. 96—108.
45. Крейнс Н. М.//Там же. 1961. Т. 40, вып. 3. С. 762—774.
46. Боровик-Романов А. С.//Там же. 1960. Т. 38, вып. 4. С. 1088—1098.
47. Боровик-Романов А. С.//Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 597.
48. Астров Д. Н.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40, вып. 4. С. 1035—1041.
49. Hornreich R. M.//Digests of the Intermag. Conf. Kyoto, 1972. P. 40.
50. Schmid H. Intern. J. Magnetism. 1974. Vol. 4. P. 337—361.
51. Ожогин В. И.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 42, № 8. С. 1625—1637.
52. Буздин А. И., Булаевский Л. Н.//Успехи физ. наук. 1984. Т. 144, вып. 3. С. 415—437.
53. Mortensen K., Tomkiewicz Y., Bechgaard K.//Phys. Rev. B. 1982. Vol. 25, № 5. P. 3319—3325.
54. Scott I. S.//J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, № 3. P. 1845—1848.
55. Walsh W. M. Jr., Wudl F., Aharon-Shalom E. e. a.//Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 49, № 12. P. 885—888.
56. Смоленский Г. А., Недлин Г. М.//Физика магнитных диэлектриков. Л.: Наука, 1974. С. 8—34.
57. Белов К. П., Соколов В. И.//Успехи физ. наук. 1977. Т. 121, вып. 2. С. 285—317.
58. Физика и химия редкоземельных элементов: Справочник/Под ред. К. Гшнайдера и Л. Айринга: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.
59. Goral J. P., Greedan J. E.//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 37. P. 315—321.
60. Wiedenmann A., Venien J. P., Palvadeau P. e. a.//J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 5339—5350.
61. Коидорский Е. И., Костица Т. И., Галкина В. Ю.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1975. Т. 69, вып. 5(11). С. 1753—1755.
62. Nishihara Y., Yamaguchi, Waki S. e. a.//J. Phys. Soc. Japan. 1983. Vol. 52, № 7. P. 2301—2303.
63. Tripathi A. K., Lal H. B.//Indian J. Pure and Appl. Phys. 1982. Vol. 20. P. 271—275.
64. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов: Пер. с нем. М.: Мир, 1976. Т. 1.
65. Yoshimura K., Nakamura Y.//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 40. P. 55—60.
66. Oleveira N. F., Shapira Y.//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, № 3. P. 1790—1795.
67. Gurewitz E., Horowitz A., Shaked H.//Phys. Rev. 1979. Vol. 20, № 11. P. 4544—4549.
68. Zandbergen H. W.//J. Solid State Chem. 1981. Vol. 37. P. 189—203.
69. Rimet R., Buder R., Schlenker C. e. a.//Solid State Commun. 1981. Vol. 37. № 9. P. 693—697.
70. Kotlicki A., McLeod B. A., Shott M. e. a.//Phys. Rev. 1984. Vol. 29, № 1. P. 26—31.
71. Phaff A. C., Swüste C. H. W., Kopinga K. e. a.//J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 6635—6649.
72. Simizu S., Chen I. Y., Fridberg S. A.//J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55, № 6, pt 2B. P. 2398—2400.
73. Takeda K., Koyama K.//J. Phys. Soc. Japan. 1983. Vol. 52, № 2. P. 648—655.
74. Lhao M. G., Du M. L.//Phys. Rev. B. 1983. Vol. 28, № 11. P. 6481—6484.
75. Ожогин В. И., Шапиро В. Г., Гуртовой К. Г. и др.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 62, вып. 6. С. 2221—2232.
76. Уайт Р.//Успехи физ. наук. 1971. Т. 103, вып. 4. С. 593—607.
77. Wada N., Ubukoshi K., Hirakawa K.//J. Phys. Soc. Japan. 1982. Vol. 51, № 9. P. 2833—2839.
78. Renaudin J., Pannetier J., Peland S.//Solid State Commun. 1983. Vol. 47, № 6. P. 445—447.
79. McAlister S. R., Strobel P.//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 30. P. 340—348.
80. Белов Н. В., Головастиков Н. И., Иващенко А. Н. и др.//Кристаллография. 1982. Т. 27, вып. 3. С. 511—515.
81. Sugano T., Kinoshita M., Shirotani I.//Solid State Commun. 1983. Vol. 45, № 2. P. 99—102.
82. Jaccarino V.//Phys. Rev. 1959. Vol. 2, № 4. P. 163—168.
83. Гуртовой К. Г., Лагутин А. С., Ожогин В. И.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1982. Т. 83, вып. 5. С. 1941—1954.
84. Бажан А. Н.//Там же. 1974. Т. 67, вып. 4(10). С. 1520—1526.
85. Котюжанский Б. Я., Прозорова Л. А., Свистов Л. Е.//Там же. 1985. Т. 88, вып. 1. С. 221—228.
86. Brown P. J., Welford P. J., Forsyth J. B.//J. Phys. C.: Solid State Phys. 1973. Vol. 6. P. 1405—1413.
87. Tsuda T., Yasuoka H.//J. Phys. Soc. Japan. 1978. Vol. 45, № 1. P. 115—121.
88. Breed D. I., Gilianse K., Miedema A. R.//Physica. 1969. Vol. 45, № 2. P. 205—211.
89. Bartolome P., Navarro R., Gonzalez D.//Ibid. 1977. Vol. 92B, № 1. P. 45—51.
90. Carlin R. L., van der Bilt A., Jong K. O.//Ibid. 1981. Vol. 111BC, № 2—3. P. 147—154.
91. Burgiel J. S., Jaccarino V., Schawlow A. L.//Phys. Rev. 1961. Vol. 122, № 2. P. 429—436.
92. Bastow T. J., Whitfield H. J., Bristow G. K.//Phys. Lett. 1981. Vol. 84A, № 5. P. 266—268.
93. Adachi A., Achiva N., Mekata M.//J. Phys. Soc. Japan. 1980. Vol. 49, № 2. P. 545—552.
94. Saez Puche R., Norton M., White T. R. e. a.//J. Solid State Chem. 1983. Vol. 50. P. 281—293.
95. Phaff A. C., Swüste C. H. W., de Jonge W. J. H.

e. a./J. Phys. C: Solid State Phys. 1984. Vol. 17. № 14. P. 2583—2594.  
 96. Васюков В. Н., Журавлев А. В., Лукин С. Н. и др.//Физ. твердого тела. 1984. Т. 26, вып. 5. С. 1297—1305.  
 97. Barbara B., Boucherle J. X., Buevoz J. L. e. a./Solid State Commun. 1977. Vol. 24, P. 481—484.  
 98. Aarts J., de Boer F. R., Horn S. e. a./Physika. 1981. Vol. 107 B. P. 381—382.  
 99. Hanzawa K., Kasuya T./J. Phys. Soc. Japan. 1984. Vol. 53. P. 1809—1818.  
 100. Yakinthous J. K., Routsis Ch., Penelope Schobinger-Paramantellous/J. Phys. Chem. Solids. 1984. Vol. 45, № 6. P. 689—693.  
 101. Ellingsen O. S., Bratsberg H., Mroczkowsky S./J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, N 11, pt 2. P. 7948—7950.  
 102. Hamaker H. C., Woolf L. D., Mac Kay H. B. e. a./Solid State Commun. 1979. Vol. 31, № 3. P. 139—144.  
 103. Hamaker H. C., Woolf L. D., Mac Kay H. B. e. a./Ibid. 1979. Vol. 32, № 4. 289—294.  
 104. Lee K., Muir H./J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 1043—1045.  
 105. Gaur K., Tripathi A. K., Lal H. B./J. Materials Sci. Lett. 1983. Vol. 2. P. 161—162.  
 106. Ishikawa M., Muller J./Solid State Commun. 1978. Vol. 27, № 8. P. 761—763.  
 107. Буздин А. И., Булаевский А. Н., Кулич М. Л. и др.//Успехи физ. наук. 1984. Т. 144, вып. 4. С. 597—680.  
 108. Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных элементов: Пер. с англ. М.: Мир, 1974.  
 109. Thomlinson W., Shirane G., Moncton D. E. e. a./J. Appl. Phys. 1970. Vol. 50, № 3, pt 2. P. 1981—1982.

110. All N., Woods S. B./J. Low Temp. Phys. 1984. Vol. 56, N 56. P. 575—584.  
 111. Schienle M., Kasten A., Muller P. H./Phys. status solidi (b). 1983. Vol. 119, N 2. P. 611—620.  
 112. Moncton D. E., Shirane G., Thomlinson W. e. a./Phys. Rev. Lett. 1978. Vol. 41, № 16. P. 1133—1136.  
 113. Raen A. M., Svare J., Pedersen V./Physica. 1983. Vol. 121 B. P. 89—94.  
 114. Trezebiatowski W./Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam — New York — Oxford: North-Holland Publ. Comp., 1980. P. 415—449.  
 115. Изюмов Ю. А./Успехи физ. наук. 1980. Т. 131, вып. 3. С. 387—422.  
 116. Lottermoser W., Müller R., Fuess M./J. Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 54—57, pt. 2. P. 1005—1006.  
 117. Боровик-Романов А. С., Котюжанский Б. Я., Прозорова Л. А./Журн. эксперим. и теорет. физ. 1970. Т. 58, вып. 6(6). С. 1911—1918.  
 118. Александров К. С., Анистратов А. Т., Мельникова С. В. и др.//Физика твердого тела. 1979. Т. 21, № 4. С. 1119—1124.  
 119. Buyers W. J. L., Morris R. M., Armstrong R. L. e. a./Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56, № 4. P. 371—373.  
 120. Cox D. E., Shapiro S. M., Cowley R. A. e. a./Phys. Rev. B. 1979. Vol. 19, № 1. P. 5754—5772.  
 121. Валянская Т. В., Плахтий В. П., Соколов В. И./Журн. эксперим. и теорет. физ. 1976. Т. 70, вып. 6. С. 2279—2285.  
 122. Прозорова Л. А., Марченко В. И., Красняк Ю. В./Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41, вып. 12. С. 522—524.

## Глава 29

# ФЕРРИТЫ И ДРУГИЕ МАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

М. В. Быстров, В. Л. Иващенко, С. А. Миронов, Р. В. Писарев

## 29.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Магнитные свойства.** Среди магнитоупорядоченных материалов в особую группу выделяют ферримангнетики, или, иначе, ферриты. В отличие от простых ферромагнетиков, или антиферромагнетиков, характерной особенностью которых является расположение магнитных атомов в трансляционно-эквивалентных узлах, к ферримангнетикам относят материалы, в которых имеются неэквивалентные в кристаллографическом и (или) в магнитном отношении подрешетки. При таком определении ферримангнетизма ферромагнетик представляет собой частный случай ферримангнетика с одной магнитной подрешеткой, а простой антиферромагнетик — частный случай ферримангнетика с двумя эквивалентными подрешетками. Наличие неэквивалентных подрешеток определяет богатство магнитных свойств ферримангнетиков, отличающихся от свойств ферро- и антиферромагнетиков, хотя при определенных условиях можно найти общие черты среди этих различных групп магнетиков.

Магнитные свойства ферримангнетиков были впервые объяснены Неелем [1] на основе двухподрешеточной модели, предложенной им для ферритов со структурой шпинели (см. ниже), в которой магнитные ионы занимают тетраэдрические позиции (узлы *A*) и октаэдрические позиции (узлы *B*). Основным взаимодействием является антиферромагнитное (отрицательное) взаимодействие между ионами из различных подрешеток, что вызывает

антипараллельное расположение их магнитных моментов. При этом результирующую намагниченность (на  $1 \text{ м}^3$  вещества) можно представить в виде разности намагниченностей подрешеток:

$$M_s(T, H) = M_B(T, H) - M_A(T, H). \quad (29.1)$$

Поведение величины  $M_s$  в зависимости от температуры и поля может носить более сложный характер, чем в ферромагнетиках, так как характер изменения  $M_A$  и  $M_B$  с температурой и с полем может быть различным. Так, при повышении температуры может быть монотонное уменьшение  $M_s$  и обращение  $M_s$  в нуль в точке Кюри  $T_c$ , выше которой вещество парамагнитно, хотя парамагнитная восприимчивость изменяется с температурой по закону, отличающемуся от закона Кюри для простых парамагнетиков. При повышении температуры в области ниже  $T_c$  возможно также увеличение спонтанной намагниченности в определенном температурном интервале. Для некоторых ферритов, в частности для многих редкоземельных ферритов — гранатов (см. табл. 29.15 и рис. 29.22), существует температура компенсации  $T_{\text{ком}}$ , при которой намагниченности подрешеток становятся одинаковыми и результирующая намагниченность обращается в нуль. Появление точки компенсации возможно также при изменении состава ферримангнетика, например в иттрий-железо-галлиевых гранатах.

При описании магнитных свойств ферритов пользуются также удельной намагниченностью насыщения

$\sigma_s = M_s/d$ , где  $d$  — плотность. Предел  $\sigma_s$  при температуре, стремящейся к нулю, обозначают  $\sigma_s^0$ . Связь между  $\sigma_s^0$  и числом магнетонов Бора  $n_B$  на одну формульную единицу феррита дается выражением

$$n_B = \frac{M}{N_A \mu_B} \sigma_s^0, \quad (29.2)$$

где  $\mu_B$  — магнетон Бора;  $M$  — молекулярная масса, соответствующая одной формульной единице;  $N_A$  — число Авогадро. Магнитный момент на молекулу  $p_m^0$  при  $T=0$  определяется как

$$p_m^0 = (n_B - n_A) \mu_B, \quad (29.3)$$

где  $n_A$ ,  $n_B$  — число магнетонов Бора, приходящихся на атомы в позициях  $A$  и  $B$  соответственно.

Энергию магнитного взаимодействия, зависящую от ориентации намагниченности относительно кристаллографических осей, называют энергией магнитной кристаллографической анизотропии. Для кубического кристалла (к ним относятся ферриты со структурой шпинели и граната) эту энергию  $E_a$  обычно записывают в виде [2]

$$E_a = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots, \quad (29.4)$$

где  $K_1$ ,  $K_2$  ... — константы анизотропии, а  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  — направляющие косинусы вектора намагниченности относительно осей, совпадающих с ребрами куба. Магнитную анизотропию можно характеризовать с помощью эффективного внутреннего поля напряженностью  $H_a = 2K_1/M_s$ .

Под действием магнитострикции при изменении намагниченности в кристалле происходит деформация кристаллической решетки. В частном случае феррита кубической структуры относительная магнитострикционная деформация может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta l}{l} = \lambda_s = \frac{3}{2} \lambda_{100} (\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - \frac{1}{3}) +$$

$$+ 3\lambda_{111} (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_1 \alpha_3 \beta_1 \beta_3), \quad (29.5)$$

где  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  — константы магнитострикции насыщения в направлениях  $[100]$  и  $[111]$  соответственно, а  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  — направляющие косинусы оси, вдоль которой изменяется деформация.

Феррит, помещенный в постоянное магнитное поле напряженностью  $H_0$  и перпендикулярное к нему переменное СВЧ-магнитное поле, поглощает СВЧ-энергию. Это поглощение носит резонансный характер (ферромагнитный резонанс) и максимально на частоте  $\omega_0$ , определенным образом связанной с полем  $H_0$ . Зависимость резонансной частоты  $\omega_0$  от  $H_0$  имеет сложный характер и определяется магнитной кристаллографической анизотропией, анизотропией формы, упруго напряженным состоянием образца и т. п. [3]. В наиболее простом случае изотропной сферы

$$\omega_0 = \gamma H_0. \quad (29.6)$$

Здесь  $\gamma$  — гиромагнитное отношение:

$$\gamma = g \frac{e}{2mc}, \quad (29.7)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $m$  — масса покоя электрона;  $c$  — скорость света;  $g$  — фактор спектроскопического расщепления. Для ферритов со структурой шпинели при наличии двух подрешеток значение  $g$ -фактора дается выражением [4]

$$g = \frac{M_B - M_A}{M_B / g_B - M_A / g_A}, \quad (29.8)$$

где  $g_A$  и  $g_B$  — факторы спектроскопического расщепления для ионов в  $A$ - и  $B$ -узлах соответственно.

Амплитуда и форма резонансной кривой поглощения определяются процессами релаксации. Наличие их приводит к тому, что компоненты тензора магнитной проницаемости становятся комплексными величинами. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитная проницаемость скалярна. Ширина резонансной кривой ферромагнитного резонанса  $\Delta H$  обычно определяется как разность полей, при которых мнимая часть диагональной компоненты тензора проницаемости  $\mu''$  составляет половину своего значения  $\mu''_{\text{рез}}$  в точке резонанса. Зависимость ее вещественной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  частей от частоты называют магнитными спектрами. Для магнитных спектров ферритов характерно наличие двух областей дисперсии. Низкочастотная область дисперсии обусловлена смещением границ доменов, а более высокочастотная — «естественным» ферромагнитным резонансом в эффективных полях анизотропии и размагничивающих полях.

**Упругие свойства и магнитоупругое взаимодействие.** Магнитоакустические эффекты в ферритах возникают в результате взаимодействия спинов магнитных ионов и упругих колебаний кристаллической решетки, т. е. в результате тех же взаимодействий, которые определяют магнитострикционные эффекты. Выражение для упругой и магнитоупругой энергий можно записать в виде

$$E_y + E_{my} = \frac{1}{2} c_{11} (e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2) + \\ + \frac{1}{4} c_{44} (e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2) + c_{12} (e_{xx} e_{yy} + e_{yy} e_{zz} + \\ + e_{zz} e_{xx}) + B_1 (\alpha_x^2 e_{xx} + \alpha_y^2 e_{yy} + \alpha_z^2 e_{zz}) + \\ + B_2 (\alpha_x \alpha_y e_{xy} + \alpha_y \alpha_z e_{yz} + \alpha_z \alpha_x e_{zx}), \quad (29.9)$$

где  $c_{11}=c_{1111}$ ,  $c_{12}=c_{1122}$ ,  $c_{44}=c_{2323}$  — коэффициенты упругой жесткости,  $B_1=b_{1111}$ ,  $B_2=b_{2323}$  — магнитоупругие коэффициенты.

Условия для упругой и магнитоупругой изотропии следующие:

$$c_{11} - c_{12} = 2c_{44}; \quad B_1 = B_2. \quad (29.10)$$

Первое условие выполняется, например, в иттриевом феррите-гранате с погрешностью до 5%. Значения коэффициентов, определяющих упругие и магнитоупругие свойства, см. в табл. 29.18, 29.21, 29.22.

**Оптические и магнитооптические свойства.** Ферриты обладают сравнительно высокой прозрачностью в ряде участков ближнего и далекого инфракрасного спектров. Ферриты-гранаты характеризуются лучшей прозрачностью, чем ферриты-шпинели. Так, в иттриевом феррите-гранате имеются окна прозрачности при длинах волн  $1 < \lambda < 0,1$  мм и  $1 < \lambda < 10$  мкм; между двумя этими областями наблюдается сильное решеточное поглощение. В редкоземельных ферритах-гранатах в первой области прозрачности могут наблюдаться поглощения при ферромагнитном резонансе (если поле анизотропии велико) в случае обменного резонанса редкоземельной подрешетки в поле железных подрешеток, а также электронные переходы между уровнями основного мультиплета редкоземельных ионов. Во второй области наблюдаются электронные переходы в редкоземельных ионах и (при более коротких длинах волн) электронные переходы в ионах железа в октаэдрических и тетраэдрических позициях. Ферриты-гранаты в видимой и ближней инфракрасных областях спектра обнаруживают значительный эффект Фарадея при распространении света вдоль вектора намагниченности и примерно такой же по модулю эффект Коттона — Мутона (магнитное линейное двупреломление) при распространении света перпендикулярно вектору намагниченности [109—110].

Ниже рассмотрены характерные особенности структуры и магнитных свойств различных групп ферритов, наиболее интересных в научном и техническом аспектах, а именно ферритов со структурой шпинели, граната, гексаферритов. Кроме того, приведены некоторые сведения о свойствах халькогенидных шпинелей, обладающих ферромагнитными и антиферромагнитными свойствами, а также сведения о ферромагнитных и антиферромагнитных халькогенидах европия и других ферромагнетиков с различной структурой. Свойства большого и важного класса ортоферритов рассмотрены в главе об антиферромагнетиках.

## 29.2. ФЕРРИТЫ-ШПИНЕЛИ

Ферриты-шпинели имеют кристаллическую структуру типа минерала шпинели  $MgAl_2O_4$  и химическую формулу  $Me^{3+}Fe_2^{2+}O_4$ , где  $Me^{2+}$  — ион двухвалентного металла, а ионы железа  $Fe^{3+}$  — трехвалентны. В случае простых ферритов  $Me$  представляет собой один из двухвалентных ионов переходных элементов, например  $Mn$ ,  $Ni$ ,  $Co$  или  $Mg$ ; возможна также комбинация этих ионов (твердые растворы ферритов или смешанные ферриты). Трехвалентные ионы железа в  $MeFe_2O_4$  могут быть полностью или частично замещены другими трехвалентными ионами, например  $Al^{3+}$  или  $Cr^{3+}$  (смешанные ферриты-алюминаты или ферриты-хромиты).

В структуре типа шпинели ионы кислорода образуют гранецентрированную кубическую решетку с ребром  $a$ . В промежутках между ионами кислорода находятся ионы металлов, причем эти ионы окружены четырьмя или шестью ионами кислорода. Такие окружения называют соответственно тетраэдрическими (или  $A$ ) и октаэдрическими (или  $B$ ) позициями. Шпинели, в которых ионы  $Me^{2+}$  находятся в тетраэдрических позициях, а ионы  $Fe^{3+}$  — в октаэдрических, называют нормальными. Если ионы  $Me^{2+}$  и половина ионов  $Fe^{3+}$  находятся в октаэдрических позициях, то шпинель называют обращенной. При смешанном распределении двухвалентные ионы металла находятся как в  $A$ -, так и в  $B$ -позициях.

Принято ионы, занимающие тетраэдрические позиции, записывать в формуле феррита перед квадратными скобками, а ионы, занимающие октаэдрические позиции, — в скобках. Тогда, например, формула цинкового феррита, имеющего структуру нормальной шпинели, запишется в виде  $Zn^{2+}[Fe_2^{3+}]O_4$ , никелевого феррита со структурой обращенной шпинели — в виде  $Fe^{3+}[Ni^{2+}Fe^{3+}]O_4$ , а распределение ионов смешанной марганцевой шпинели — формулой  $Fe_{0,2}Mn_{0,8}^{2+}[Mn_{0,2}^{3+}Fe_{1,8}^{3+}]O_4$ .

Свойства ферритов-шпинелей отражены в табл. 29.1—29.9 и на рис. 29.1—29.19.

### А. Простые ферриты

Таблица 29.1. Значения основных параметров простых ферритов со структурой шпинели

пк — поликристаллический; мк — монокристаллический; тетр — тетрагональный; куб — кубический

| Параметр*                                                              | $Fe_3O_4$                             | $MgFe_2O_4$                                               | $MnFe_2O_4$                                                                     | $CuFe_2O_4$                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Постоянная решетки $a$ , нм                                            | 0,839 [5]                             | 0,836 [50]                                                | 0,8517 [23]                                                                     | 0,837 (куб.)* <sup>2</sup> [34]<br>$c = 0,870$ } (тетр.)<br>$a = 0,822$ } [35] |
| Распределение катионов                                                 | $Fe[Fe^{2+} Fe]$ [6]                  | $Mg_{0,1}Fe_{0,9}$ ,<br>$[Mg_{0,9}Fe_{1,1}]$<br>[50, 51]  | $Mn_{0,8}Fe_{0,2}$ ,<br>$[Mn_{0,2}Fe_{1,8}]$ [23]                               | $Fe[CuFe]$ [36]                                                                |
| Кислородный параметр $u$                                               | 0,379 [6]                             | 0,381 [50]                                                | 0,385 [23]                                                                      | 0,380 [12]                                                                     |
| Рентгеновская плотность $d_X$ ,<br>$10^3$ кг/м <sup>3</sup>            | 5,24 [6]                              | 4,52 [50]                                                 | 5,0 [23]                                                                        | 5,35 [12]                                                                      |
| Температура Кюри $T_C$ , К                                             | 858 [5]                               | 713 [5]                                                   | 573 [5]                                                                         | 728 [5]                                                                        |
| Магнитный момент на молекулу<br>$\mu_m$ , $\mu_B$                      | 4,1 (0 К) [6]                         | 1,1 (25 К) [52]                                           | 4,6 (0 К) [23]                                                                  | 2,3 (куб) (0 К) [37]<br>1,3 (тетр) (0 К) [37]                                  |
| Удельная намагниченность насыщения $\sigma_s$ , А · м <sup>2</sup> /кг | 98 (0 К) [5]<br>92 (300 К) [5]        | 31 (0 К) [58]<br>27 (300 К) [5]                           | 112 (0 К) [58]<br>80 (300 К) [5]                                                | 30 (0 К) [5]<br>25 (300 К) [5]                                                 |
| Намагниченность насыщения $M_s$ ,<br>кА/м                              | 510 (0 К) [5]<br>477 (300 К) [5]      | 143 (0 К) [5]<br>119 (300 К) [5]                          | 557 (0 К) [5]<br>398 (300 К) [5]                                                | 158 (0 К) [5]<br>135 (300 К) [5]                                               |
| Первая константа анизотропии $K_1$ ,<br>$10^3$ Дж/м <sup>3</sup>       | —10,7 [7]                             | —3,5 [53]<br>—2,5 [54]                                    | —18,7 (77 К) [24]<br>—2,8 (300 К) [24]<br>—0,3 (77 К) [24]<br>—0,2 (300 К) [24] | —20,6 (77 К) [38]<br>—6,3 (300 К) [38]                                         |
| Вторая константа анизотропии $K_2$ ,<br>$10^3$ Дж/м <sup>3</sup>       | —2,8 [7]                              | —                                                         | —                                                                               | —                                                                              |
| Константа магнитострикции $\lambda$ ,<br>$10^{-6}$                     | 77,6 [111] —19,5 [100], 57,1 [110, 8] | 2,0 [111] —6( $\lambda_s$ ) [17]<br>—10,6 [100, 59]       | —1 [111] —5( $\lambda_s$ ) [5]<br>—35 [100] [14]                                | —15 ( $\lambda_s$ ) [39]                                                       |
| Фактор спектроскопического расщепления $g$                             | 2,03 (123 К) [9]<br>2,12 (294 К) [9]  | 2,03—2,06 (пк) [55]                                       | 2,019 (77 К) [24]<br>2,004 (300 К) [24]                                         | 2,20 (77 К) [39]<br>2,04 (300 К) [39]                                          |
| Ширина линии ферромагнитного резонанса $\Delta H$ , кА/м               | —                                     | 1,59 [53]                                                 | 0,95 (423 К) [25]<br>1,03 (294 К) [26]                                          | 27,8 (пк) [41]                                                                 |
| Относительная начальная магнитная проницаемость $\mu_H$                | 70 (пк) [8]                           | 36 (пк) [54]                                              | 250 [5]                                                                         | 70 [40]                                                                        |
| Диэлектрическая проницаемость<br>$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$  | —                                     | $\epsilon' = 9,66$ (4,55 ГГц)<br>$\epsilon'' = 0,17$ [42] | —                                                                               | $\epsilon' = 9,24$ (4,55 ГГц)<br>(пк) [42]<br>$\epsilon'' = 0,52$              |
| Удельное сопротивление $\rho_0$ ,<br>$10^4$ Ом · м                     | $5 \cdot 10^{-9}$ [10, 43]            | $\sim 1$ ( $T = 373$ К) [44]                              | $2 \cdot 10^{-3}$ [27]<br>( $Mn_{1,16}Fe_{1,84}O_4$ )                           | $\sim 1$ (373 К) [44]                                                          |

| Параметр <sup>*1</sup>                                                      | CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                     | NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>  | Li <sub>0,5</sub> Fe <sub>2,5</sub> O <sub>4</sub> |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| Постоянная решетки $a$ , нм                                                 | 0,838 [17]                                                           | 0,8337 [11, 13]                   | 0,833 [28]                                         |
| Распределение катионов                                                      | Fe[CoFe] [45]                                                        | Fe[NiFe] [12]                     | Fe[Li <sub>0,5</sub> Fe <sub>1,5</sub> ] [28]      |
| Кислородный параметр $u$                                                    | 0,381 [45]                                                           | 0,381 [60]                        | 0,382 [28]                                         |
| Рентгеновская плотность $d_X$ ,<br>10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>        | 5,29 [45]                                                            | 5,37 [13]                         | 4,75 [28]                                          |
| Температура Кюри $T_C$ , К                                                  | 793 [5]                                                              | 858 [13]                          | 943 [5]                                            |
| Магнитный момент на молекулу<br>$\rho_m^0$ , $\mu_B$                        | 3,94 (0 K) [46]                                                      | 2,3 (0 K) [5]                     | 2,6 (0 K) [5]                                      |
| Удельная намагниченность насы-<br>щения $\sigma_s$ , А · м <sup>2</sup> /кг | 94 (0 K) [58]                                                        | 56 (0 K) [58]                     | 69 (0 K) [58]                                      |
| Намагниченность насыщения $M_s$ ,<br>кА/м                                   | 80 (300 K) [5]                                                       | 50 (300 K) [5]                    | 65 (300 K) [5]                                     |
| Первая константа анизотропии $K_1$ ,<br>10 <sup>3</sup> Дж/м <sup>3</sup>   | 477 (0 K) [5]                                                        | 302 (0 K) [5]                     | 334 (0 K) [5]                                      |
| Вторая константа анизотропии $K_2$ ,<br>10 <sup>3</sup> Дж/м <sup>3</sup>   | 422 (300 K) [5]                                                      | 255 (300 K) [61]                  | 285 (300 K) [61]                                   |
|                                                                             | 4,4 · 10 <sup>2</sup> (77 K) [15]                                    | —8,7 (77 K) [14]                  | —12,7 (77 K) [29]                                  |
|                                                                             | 2,9 · 10 <sup>2</sup> (300 K) [15]                                   | —6,2 (300 K) [14]                 | —8,4 (300 K) [29]                                  |
|                                                                             | —                                                                    | —3 [16]                           | —9,7 (77 K) [30]                                   |
|                                                                             |                                                                      |                                   | —0,2 (300 K) [30]                                  |
| Константа магнитострикции $\lambda$ , 10 <sup>-6</sup>                      | 120 [111] (Co <sub>0,8</sub> Fe <sub>2,2</sub> O <sub>4</sub> ) [15] | —4 [111] —26 ( $\lambda_s$ ) [17] | 2,7 [111] —8 ( $\lambda_s$ ) [31]                  |
| Фактор спектроскопического рас-<br>щепления $g$                             | —590 [100]—110 ( $\lambda_s$ ) [17]                                  | —36 [100, 14]                     | —28,7 [100, 2]                                     |
| Ширина линии ферромагнитного<br>резонанса $\Delta H$ , кА/м                 | 2,7 (363 K) (мк) [48]                                                | 2,198 (85 K) [18]                 | 2,012 (77 K) [30]                                  |
| Относительная начальная магнит-<br>ная проницаемость $\mu_H$                | 2,22 (373 K) (пк) [49]                                               | 2,196 (298 K) [18]                | 2,003 (300 K) [30]                                 |
| Диэлектрическая проницаемость<br>$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$       | —                                                                    | 0,75 [19]                         | 0,06 (134 K) [32]                                  |
| Удельное сопротивление $\rho_0$ ,<br>10 <sup>4</sup> Ом · м                 | 25 (пк) [5]                                                          | 1,19 [20]                         | 0,14 [32]                                          |
|                                                                             | $\epsilon' = 10$ (4,55 ГГц, пак) [42]                                | 80 (мк) [14]                      | 33 (пк) [5]                                        |
|                                                                             |                                                                      | 39 (пк) [21]                      | —                                                  |
|                                                                             |                                                                      | 19 (мк) [14]                      |                                                    |
|                                                                             |                                                                      | 21 (пк) [14]                      |                                                    |
|                                                                             |                                                                      | 2 [22]                            | ~1 · 10 <sup>-4</sup> [33]                         |

\*1 Значения физических величин приведены, если не оговорено специально, для монокристаллов при температуре 293 К.

\*2 Структура медного феррита CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> зависит от термообработки. При медленном охлаждении ниже температуры transforma-  
ции  $T_{тр}$  происходит переход кубической структуры в тетрагональную.  $T_{тр} = 1033$  К [36], 688 К [56] и 663 К [57]. В результате зака-  
ливания при  $T > T_{тр}$  кубическая структура сохраняется при температуре 293 К.

### Б. Смешанные ферриты

Таблица 29.2. Результаты экспериментов  
по дифракции нейтронов в ряде образцов  
ферритов  $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4$  [11]

$T_{зак}$  — температура закалки;  $a$  — постоянная решетки;  
 $u$  — кислородный параметр

| $x$  | $T_{зак}$ , К | $a$ , нм | $u$    | Доля ионов в тетра-<br>эдрических узлах |                  |
|------|---------------|----------|--------|-----------------------------------------|------------------|
|      |               |          |        | Mg <sup>2+</sup>                        | Mn <sup>2+</sup> |
| 0,25 | 1673          | 0,8485   | 0,3850 | 0,12                                    | 0,89             |
| 0,25 | 1273          | 0,8479   | 0,3848 | 0,09                                    | 0,78             |
| 0,5  | 1673          | 0,8455   | 0,3839 | 0,18                                    | 0,92             |
| 0,5  | 1273          | 0,8450   | 0,3836 | 0,14                                    | 0,82             |
| 0,75 | 1673          | 0,8424   | 0,3834 | 0,24                                    | 0,90             |
| 0,75 | 1273          | 0,8421   | 0,3831 | 0,21                                    | 0,98             |
| 0,9  | 1673          | 0,8406   | 0,3831 | 0,25                                    | 1,00             |
| 0,9  | 1273          | 0,8403   | 0,3821 | 0,21                                    | 0,90             |

Таблица 29.3. Зависимость некоторых параметров  
кобальтцинковых ферритов  $Co_xZn_{1-x}Fe_2O_4$   
от содержания кобальта  $x$  [62, 63]

$T_C$  — температура Кюри;  $\sigma_s$  — удельная намагниченность  
насыщения

| $x$ | $T_C$ , К | $\rho_m^0$ , $\mu_B$ | $\sigma_s$ , А · м <sup>2</sup> /кг, при температуре $T$ , К |       |       |       |
|-----|-----------|----------------------|--------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|     |           |                      | 285                                                          | 77    | 20    | 0     |
| 0,2 | 298       | 4,06                 | 18,5                                                         | 62,0  | 72,6  | 95,0  |
| 0,3 | 355       | 4,90                 | 39,3                                                         | 91,0  | 95,5  | 114,0 |
| 0,4 | 410       | 5,78                 | 61,0                                                         | 119,2 | 126,0 | 132,0 |
| 0,6 | 548       | 6,03                 | 87,5                                                         | 128,5 | 133,2 | 143,0 |
| 0,8 | 662       | 4,87                 | 93,7                                                         | 110,0 | 110,0 | 115,5 |
| 0,9 | 733       | 4,29                 | 90,0                                                         | 93,9  | 94,1  | 102,0 |
| 1,0 | 788       | 3,67                 | 83,6                                                         | 83,0  | 82,6  | 87,5  |

Таблица 29.4. Зависимость намагниченности насыщения  $M_s$  и фактора спектроскопического расщепления  $g$  для поликристаллического феррита  $\text{Co}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_2\text{O}_4$  от температуры

Приведены также значения  $g$ -фактора и первой константы анизотропии  $K_1$  для монокристалла того же состава. Температура Кюри  $T_C = 613$  К. Измерения в интервале температур от 223 до 283 К проводились на частоте 23,6 ГГц, а в интервале от 293 до 553 К — на частоте 9,25 ГГц [64, 65]

| $T, \text{ К}$ | Поликристалл        |      | Монокристалл |                            |
|----------------|---------------------|------|--------------|----------------------------|
|                | $M_s, \text{ кА/м}$ | $g$  | $g$          | $K_1, 10^4 \text{ Дж/м}^3$ |
| 223            | 560                 | —    | 1,90         | 12,03                      |
| 248            | 545                 | —    | 1,90         | 8,41                       |
| 283            | 500                 | —    | 1,91         | 4,51                       |
| 293            | 506                 | 2,07 | 1,91         | 2,36                       |
| 313            | 450                 | 2,10 | 1,92         | 1,34                       |
| 333            | 381                 | 2,11 | 1,96         | 0,16                       |
| 353            | 338                 | 2,12 | 2,06         | —0,21                      |
| 393            | 269                 | 2,15 | 2,12         | —0,41                      |
| 433            | 203                 | 2,16 | 2,12         | —0,34                      |
| 473            | 134                 | 2,17 | 2,17         | —0,21                      |
| 513            | 61                  | 2,18 | 2,16         | —0,07                      |
| 553            | 8                   | 2,19 | 2,15         | —0,01                      |

Таблица 29.6. Значения фактора спектроскопического расщепления  $g$  и магнитного момента на молекулу  $p_m^0$  для феррита  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$  и его твердых растворов с  $\text{CdFe}_2\text{O}_4$  и  $\text{LiAl}_5\text{O}_8$  [68]

| Состав                                                             | $g (T = 300 \text{ К})$ | $p_m^0, \mu_B$ |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|
| $\text{LiFe}_5\text{O}_8$                                          | 1,96                    | 2,38           |
| $(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,75}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,25}$ | 1,97                    | 3,44           |
| $(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,65}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,35}$ | 1,96                    | 4,10           |

Таблица 29.5. Зависимость некоторых параметров никелевых ферритов — алюминатов  $\text{NiFe}_{2-x}\text{Al}_x\text{O}_4$  от содержания алюминия  $x$  [66, 67]

$a$  — постоянная решетки;  $T_C$  — температура Кюри;

$p_m^0$  — магнитный момент на молекулу;  $g$  — фактор спектроскопического расщепления

| $x$   | $a, \text{ нм}$ | $T_C, \text{ К}$ | $p_m^0, \mu_B$       |                    | $g$ |
|-------|-----------------|------------------|----------------------|--------------------|-----|
|       |                 |                  | медленное охлаждение | закалка при 1623 К |     |
| 0,00  | 0,8337          | 580              | 2,29                 | 2,29               | 2,3 |
| 0,25  | 0,83062         | 506              | 1,30                 | 1,59               | 2,7 |
| 0,45  | 0,82769         | 465              | 0,61                 | 1,19               | —   |
| 0,50  | 0,82705         | 430              | 0,44                 | 0,99               | 6,9 |
| 0,625 | 0,82521         | 360              | 0—0,045              | —                  | 3,8 |
| 0,75  | 0,82329         | 294              | 0,38                 | 0,58               | 1,5 |
| 1,00  | 0,81951         | 198              | 0,64                 | 0,42               | —   |

Продолжение табл. 29.6

| Состав                                                             | $g (T = 300 \text{ К})$ | $p_m^0, \mu_B$ |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|
| $(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,50}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,50}$ | 1,97                    | 4,70           |
| $(\text{LiFe}_5\text{O}_8)_{0,25}(\text{CdFe}_2\text{O}_4)_{0,75}$ | 1,99                    | 4,53           |
| $\text{Li}(\text{Fe}_{0,9}\text{Al}_{0,1})_5\text{O}_8$            | 1,97                    | 1,99           |
| $\text{Li}(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_5\text{O}_8$            | 1,99                    | 0,62           |
| $\text{Li}(\text{Fe}_{0,7}\text{Al}_{0,3})_5\text{O}_8$            | 2,01                    | 0,10           |
| $\text{Li}(\text{Fe}_{0,6}\text{Al}_{0,4})_5\text{O}_8$            | —                       | 0,13           |

Таблица 29.7. Зависимость параметров литий-хромовых ферритов от содержания хрома [69]

| Содержание хрома $x$ | Распределение ионов металлов                                                                   | $a, \text{ нм}$ | $T_C, \text{ К}$ | $T_{\text{комп}}, \text{ К}$ | $p_m^0, \mu_B$ |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------|----------------|
| 0,0                  | $\text{Fe}_{1,00}[\text{Li}_{0,50}\text{Fe}_{1,50}]\text{O}_4$                                 | 0,8331          | 953              | —                            | 2,47—2,60      |
| 0,50                 | $\text{Fe}_{1,00}[\text{Li}_{0,50}\text{Fe}_{1,00}\text{Cr}_{0,50}]\text{O}_4$                 | 0,8306          | 773              | —                            | 1,50—1,62      |
| 0,75                 | $\text{Fe}_{0,98}\text{Li}_{0,02}[\text{Li}_{0,48}\text{Fe}_{0,77}\text{Cr}_{0,75}]\text{O}_4$ | 0,8296          | 683              | —                            | 1,35           |
| 1,00                 | $\text{Fe}_{0,96}\text{Li}_{0,04}[\text{Li}_{0,44}\text{Fe}_{0,56}\text{Cr}_{1,00}]\text{O}_4$ | 0,8292          | 588              | 478                          | 0,84           |
| 1,25                 | $\text{Fe}_{0,91}\text{Li}_{0,09}[\text{Li}_{0,41}\text{Fe}_{0,34}\text{Cr}_{1,25}]\text{O}_4$ | 0,8290          | 487              | 311                          | 0,61           |
| 1,50                 | $\text{Fe}_{0,80}\text{Li}_{0,20}[\text{Li}_{0,30}\text{Fe}_{0,20}\text{Cr}_{1,50}]\text{O}_4$ | 0,8287          | 392              | 257                          | 0,55           |
| 1,60                 | $\text{Fe}_{0,64}\text{Li}_{0,36}[\text{Li}_{0,14}\text{Fe}_{0,26}\text{Cr}_{1,60}]\text{O}_4$ | 0,8288          | 440              | 284                          | 0,42           |
| 1,70                 | $\text{Fe}_{0,54}\text{Li}_{0,46}[\text{Li}_{0,14}\text{Fe}_{0,26}\text{Cr}_{1,70}]\text{O}_4$ | 0,8290          | 428              | 293                          | 0,22           |
| 2,00                 | $\text{Fe}_{0,50}\text{Li}_{0,50}[\text{Cr}_{2,00}]\text{O}_4$                                 | 0,8288          | 353±16           | 310±15                       | —              |

Таблица 29.8. Основные характеристики хромовых халькогенидных шпинелей

| Соединение                 | Параметр решетки, $10^{-1}$ нм | Тип магнитного упорядочения | Температура Кюри или Нееля, К | Магнитный момент $\mu_B$ / мол. | Край поглощения, мкм |       | Тип проводимости и удельное сопротивление $\rho$ , Ом · м, при 300 К | Литература      |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------|----------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                            |                                |                             |                               |                                 | 300 К                | 4,2 К |                                                                      |                 |
| $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ | 10,755                         | Ферромагнитное              | 130                           | 5,98                            | 0,94                 | 1,08  | Полупроводник $p$ -типа, $10^2$ — $10^3$                             | [76, 77, 78—81] |
| $\text{CdCr}_2\text{S}_4$  | 10,244                         | »                           | 85                            | 5,9                             | 0,79                 | 0,69  | То же $n$ -типа, $10^4$ — $10^6$                                     | [78, 79, 82—84] |
| $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ | 10,753                         | »                           | 106                           | 5,6                             | 1,48                 | 3,88  | То же $p$ -типа, $0,7 \cdot 10^{-2}$                                 | [78, 85—88]     |
| $\text{HgCr}_2\text{S}_4$  | 10,237                         | Антиферромагнитное          | 36                            | 5,5                             | —                    | 1,27  | То же                                                                | [89, 90]        |
| $\text{ZnCr}_2\text{Se}_4$ | 10,443                         | »                           | 20                            | —                               | 0,97                 | 1,10  | То же $p$ -типа                                                      | [91, 92]        |

Таблица 29.9. Магнитооптические параметры некоторых хромовых халькогенидных шпинелей

| Соединение                 | Фарадеевское вращение, град/см              | Магнитооптическая добротность, град/дБ | Литература |
|----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|------------|
| $\text{CdCr}_2\text{S}_4$  | $8,0 \cdot 10^3$<br>( $\lambda = 0,8$ мкм)  | 30 ( $\lambda = 1$ мкм)                | [93]       |
|                            | $T = 80$ К, $H = 480$ кА/м                  |                                        |            |
| $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ | $9,2 \cdot 10^3$<br>( $\lambda = 1,17$ мкм) | 63 ( $\lambda = 1,3$ мкм)              | [94]       |
|                            | $T = 82$ К, $H = 1200$ кА/м                 |                                        |            |

Продолжение табл. 29.9

| Соединение                 | Фарадеевское вращение, град/см                                                 | Магнитооптическая добротность, град/дБ | Литература |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------|
| $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$ | $10^3$                                                                         | 4,5                                    | [95]       |
|                            | $T = 85$ К, $H = 360$ кА/м, $\lambda = 10,6$ мкм                               |                                        |            |
| $\text{CoCr}_2\text{S}_4$  | $1,3 \cdot 10^6$ ( $\lambda = 1$ мкм, $T = 80$ К) (вычислено из эффекта Керра) | —                                      | [96]       |

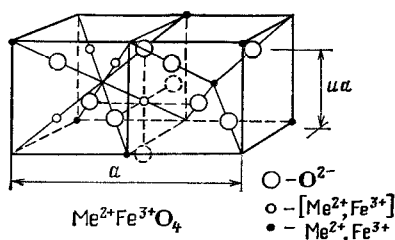


Рис. 29.1. Два октанта шпинельной структуры. Большие светлыми кружками обозначены ионы кислорода, малыми светлыми и черными кружками — ионы металла в октаэдрических и тетраэдрических позициях соответственно [5]

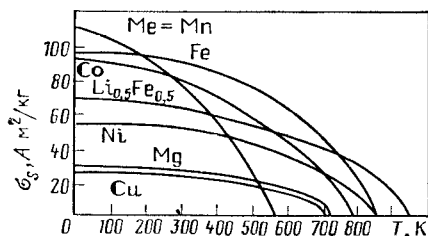


Рис. 29.2. Зависимость удельной намагниченности насыщения  $\sigma_s$  для некоторых простых ферритов-шпинелей от температуры [5]

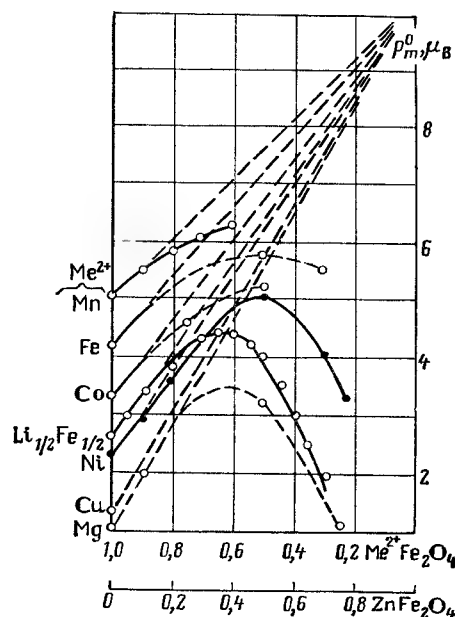


Рис. 29.3. Магнитные моменты насыщения  $P_m^0$  при 0 К некоторых смешанных ферритов, полученных замещением магнитных ионов двухвалентного металла  $\text{Me}^{2+}$  немагнитными ионами цинка ( $\text{Me}^{2+}$  — один из ионов Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Mg или  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}$ ) [37]

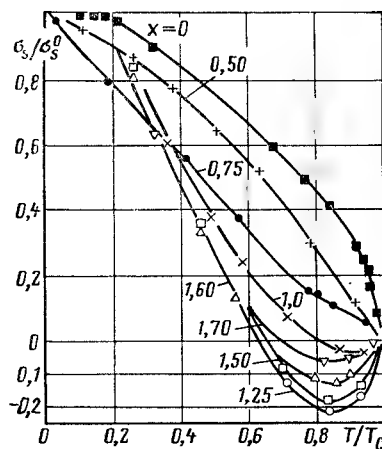


Рис. 29.4 Зависимость относительной намагниченности насыщенных  $\sigma_s/\sigma_s^0$  от приведенной температуры  $T/T_c$  для литевых ферритов-хромитов  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$  [70]

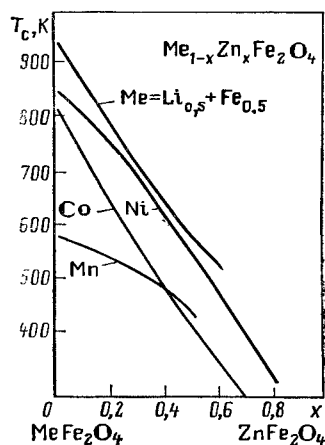


Рис. 29.5. Зависимость точки Кюри  $T_c$  некоторых смешанных ферритов типа  $\text{Me}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  от концентрации цинка [5]

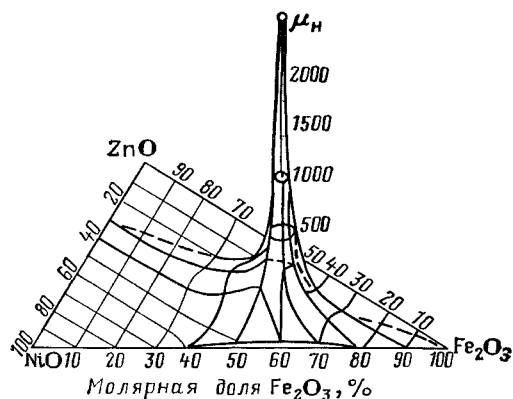


Рис. 29.6. Зависимость начальной магнитной проницаемости  $\mu_H$  ферритов в системе  $\text{Ni-ZnO-Fe}_2\text{O}_3$  от их состава [71]

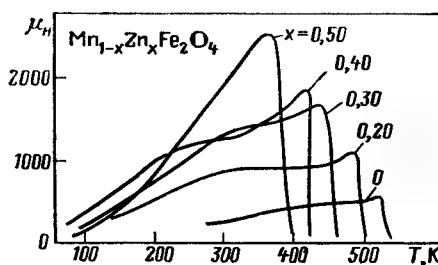


Рис. 29.7. Зависимость начальной магнитной проницаемости  $\mu_H$  смешанных марганец-цинковых ферритов от температуры [5]

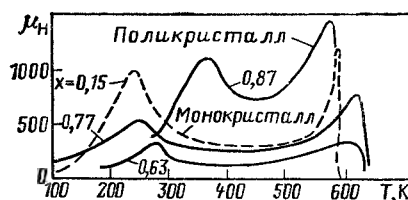


Рис. 29.8. Зависимость начальной магнитной проницаемости  $\mu_H$  от температуры для ферритов  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x^{2+}\text{Fe}_2\text{O}_4$  [72]

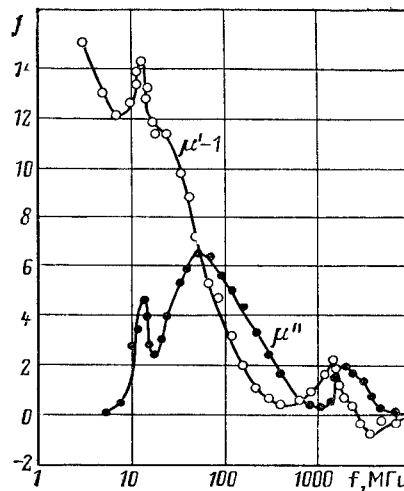


Рис. 29.9. Зависимость вещественной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  частей начальной магнитной проницаемости от частоты для поликристаллического феррита  $(\text{MgO})_{0.81}(\text{FeO})_{0.19}\text{Fe}_2\text{O}_3$  при температуре 293 К [54];  $d = 3,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\sigma_s(299 \text{ К}) = 26,4 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$



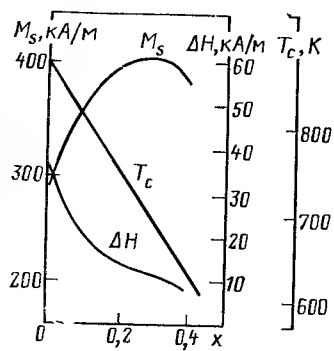


Рис. 29.10. Зависимость намагниченности насыщения  $M_s$ , ширины линии ФМР  $\Delta H$  (10 ГГц) при температуре 293 К и температуры Кюри  $T_c$  литиевых ферритов состава  $\text{Li}_{0,5-x/2}\text{Zn}_x\text{Fe}_{2,5-x/2}\text{O}_4$  от  $x$  [61]

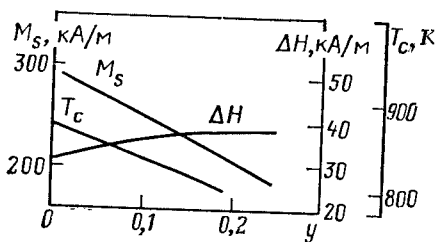


Рис. 29.11. Зависимость намагниченности насыщения, ширины линии ФМР  $\Delta H$  (10 ГГц) при температуре 293 К и температуры Кюри  $T_c$  литиевого феррита состава  $\text{Li}_{0,5+y/2}\text{Fe}_{2,5-3y/2}\text{Ti}_y\text{O}_4$  (с добавками ионов Мп и Вi) от  $y$  [61]

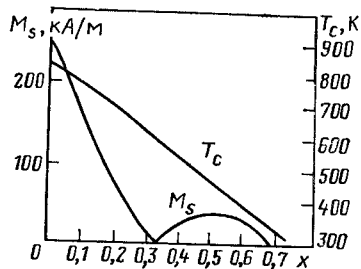


Рис. 29.12. Зависимость намагниченности насыщения при комнатной температуре и температуры Кюри никелевого феррита состава  $\text{NiFe}_{2-2x}\text{Al}_{2x}\text{O}_4$  от  $x$ . (Образцы были тщательно отожжены [61].)

Рис. 29.15. Температурная зависимость ширины резонансной кривой сферы из  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  [76]:  $T=4,2$  К;  $f=8,9$  ГГц; постоянное магнитное поле направлено по оси [111]

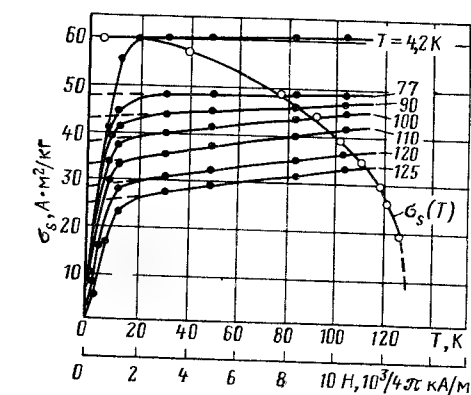


Рис. 29.13. Зависимости спонтанной удельной намагниченности от внешнего магнитного поля при различной температуре и от температуры  $\sigma_s(T)$  в  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  [76]

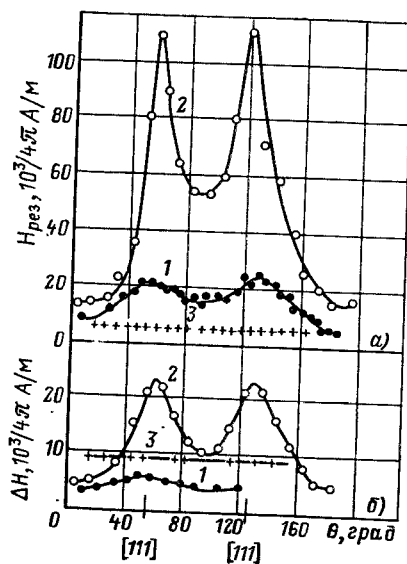


Рис. 29.14. Угловые зависимости резонансного поля (а) и ширины резонансной кривой (б) сферы из  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  [76]:  $T=4,2$  К;  $\theta$  — угол между линиями постоянного магнитного поля и осью [100]; 1 — кристалл, выращенный методом кристаллизации из квазигомогенного расплава; 2 — кристалл, выращенный методом переноса в жидкой фазе; 3 — кристалл, выращенный методом кристаллизации из квазигомогенного расплава, с молярной примесью Ag 0,08%

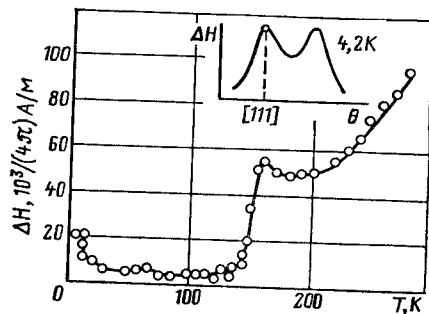


Рис. 29.18. Зависимость удельного сопротивления монокристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{In}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$   $n$ -типа от температуры [80] при различных значениях  $x$

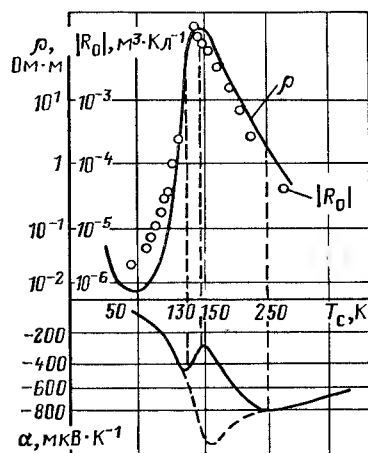


Рис. 29.16. Температурная зависимость удельного электросопротивления  $\rho$ , нормального коэффициента Холла  $R_0$  и коэффициента термо-ЭДС  $\alpha$  для образца  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  (примесь — 1%  $\text{In}$ ) [77]:  
 — зависимость, полученная экспериментально;  
 - - - - - расчет по однозонной модели

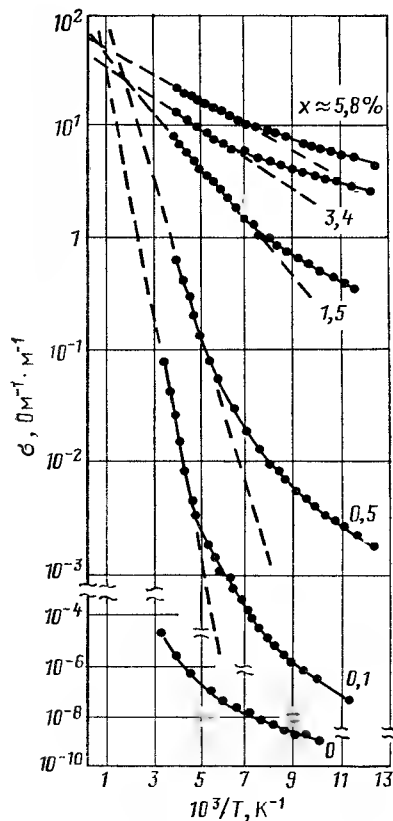


Рис. 29.17. Зависимость удельной проводимости монокристаллов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Cr}_2\text{Se}_4$   $p$ -типа от температуры при различных значениях  $x$  [78]. Данные по электропроводности чистого кристалла (кривая  $x=0$ ) взяты из [79]

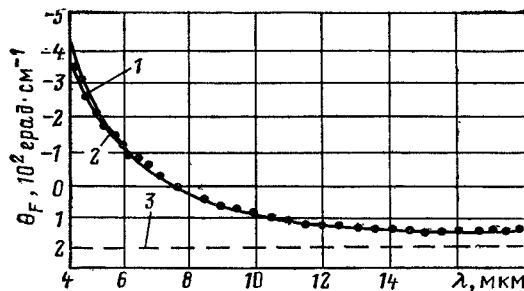
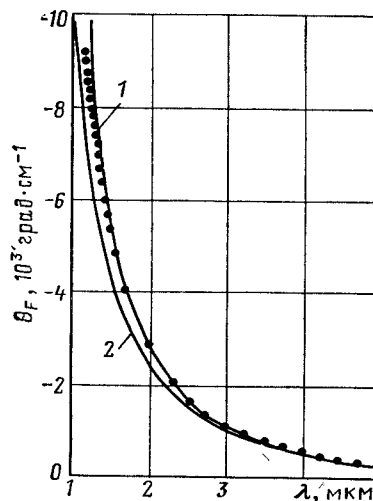
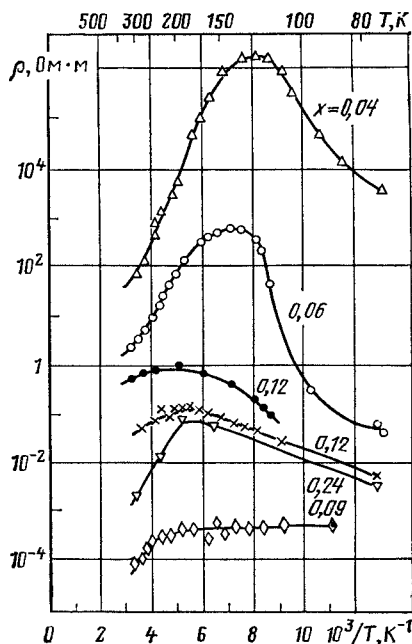


Рис. 29.19. Спектральная зависимость фарадеевского вращения в  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  при  $T=82\text{ K}$ ,  $H=1,2 \cdot 10^8\text{ кА/м}$  [81] (точки — экспериментальные значения, линии — расчетные зависимости):

1 — соответствующая резонансной длине волны; 2 — квадратичному закону; 3 — постоянный вклад от ФМР

### 29.3. ФЕРРИТЫ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА

**Кристаллографическая структура.** Ферритмагнитные оксиды типа граната кристаллизуются в структуре, изоморфной классическому минералу гранату  $\{Ca_2\}[Al_2](Si_3)O_{12}$ . Структура граната описывается кубической пространственной группой  $Ia\bar{3}d — O_h^{10}$ . Элемент структуры показан на рис. 29.20. Кубическая элементарная ячейка граната содержит восемь формульных единиц. Шестнадцать ионов  $Al^{3+}$  занимают октаэдрические позиции, обозначаемые  $16a$ , двадцать четыре иона  $Si^{4+}$  занимают позиции в центрах тетраэдров, обозначаемые  $24d$ , и двадцать четыре иона  $Ca^{2+}$  находятся в окружении из восьми ионов кислорода, и их позиции обозначаются  $24c$ .

Интерес к структуре граната значительно возрос после синтеза ферритмагнитных гранатов типа  $M_3Fe_5O_{12}$ , где  $M$  — ион редкоземельного металла или иттрия.

**Магнитные свойства и намагниченность насыщения.** В гранатах в отличие от ферритов со структурой шпинеля были введены в рассмотрение три магнитные подрешетки. Наиболее сильное антиферромагнитное взаимодействие, определяющее температуру Кюри  $T_c$ , осуществляется между ионами трехвалентного железа в октаэдрической  $16a$ - и тетраэдрической  $24d$ -подрешетках. Подрешетка редкоземельных ионов  $24c$  наиболее сильно связана отрицательным обменным взаимодействием с тетраэдрической подрешеткой (в гранатах с легкими редкоземельными ионами от  $Pr$  до  $Sm$  — октаэдрической подрешеткой), причем эта связь примерно в 10 раз слабее, чем  $(a-d)$ - взаимодействие. Намагниченность насыщения  $M_s$  в случае тяжелых редкоземельных гра-

натов может быть записана через намагниченности отдельных подрешеток следующим образом:

$$M_s = M_{24d} - M_{16a} - M_{24c}. \quad (29.11)$$

**Ферромагнитный резонанс и анизотропия.** Ферриты-гранаты имеют меньшую удельную намагниченность, чем ферриты-шпинели, и большой интерес к ним был вызван в основном их уникальными свойствами в СВЧ-диапазоне. Минимальные значения ширины линии ферромагнитного резонанса  $\Delta H \approx 16$  А/м (0,2 Э) были получены в иттриевом феррите-гранате, свободном от примесей редкоземельных ионов.

Для теоретической интерпретации результатов по ферромагнитному резонансу и анизотропии редкоземельных ферритов-гранатов необходим одновременный учет расщепления уровней ионов под действием кристаллического поля, спин-орбитального и обменного взаимодействий, которые подчас являются величинами одного порядка. В настоящее время информация об электронных уровнях ионов редкоземельных элементов еще недостаточна для надежной теоретической интерпретации результатов.

**Магнитострикция.** Магнитострикция редкоземельных ферритов-гранатов линейно связана с концентрацией редкоземельных ионов и сильно возрастает при понижении температуры. Рекордные значения  $\lambda_{111} = 2420 \cdot 10^{-6}$  и  $\lambda_{100} = 1200 \cdot 10^{-6}$  в поле напряженностью  $H = 2000$  кА/м при температуре 4,2 К были получены в тербиевом феррите-гранате, что сравнимо по порядку с магнитострикцией редкоземельных металлов.

Свойства ферритов со структурой граната приведены в табл. 29.10—21.31 и на рис. 29.20—29.30.

Таблица 29.10 Структура граната [111]

| Пространственная группа         | $Ia\bar{3}d — O_h^{10}$     |          |                             |          |
|---------------------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| Типичная идеальная формула      | $\{Ca_2\}$                  | $[Al_2]$ | $(Si_3)$                    | $O_{12}$ |
| Позиция пространственной группы | $24c$                       | $16a$    | $24d$                       | $96h$    |
| Координаты                      | $0 \frac{1}{4} \frac{1}{8}$ | $000$    | $0 \frac{1}{4} \frac{3}{8}$ | $x y z$  |

Продолжение табл. 29.10

| Пространственная группа        | $Ia\bar{3}d — O_h^{10}$    |           |           |   |
|--------------------------------|----------------------------|-----------|-----------|---|
| Точечная симметрия (локальная) | 222                        | $\bar{3}$ | $\bar{4}$ | 1 |
| Кислородная координация        | 8                          | 6         | 4         | — |
| Тип полиэдра                   | Додекаэдр (искаженный куб) | Октаэдр   | Тетраэдр  | — |

Таблица 29.11. Уточнения кристаллической структуры граната  $Y_3 Fe_5 O_{12}$  [112—115]

Постоянная решетки  $a = 12,376, 10^{-1}$  нм

|              | $x$        | $y$        | $z$ |
|--------------|------------|------------|-----|
| — 0,0274 (9) | 0,0572 (9) | 0,1495 (9) |     |
| — 0,0270 (4) | 0,0569 (5) | 0,1505 (5) |     |
| — 0,0271 (1) | 0,0567 (1) | 0,1504 (1) |     |

| Ион      | Расстояние, $10^{-1}$ нм |             | Ион           | Расстояние, $10^{-1}$ нм |
|----------|--------------------------|-------------|---------------|--------------------------|
| $O^{2-}$ | $2Y^{3+}$ 2,357 (1)      | 2,436 (1)   | $Fe^{3+} [a]$ | 3,46                     |
|          | 2,017 (1)                | —           |               | 3,46                     |
|          | 1,865 (1)                | —           |               | 2,017                    |
|          | 2·2,692 (2)              | 2,789 (2)   | $Fe^{3+} (d)$ | 2·3,09                   |
|          | 2,837 (2)                | 2,976 (2)   |               | 3,46                     |
|          | 2·3,005 (2)              | 2·3,146 (2) |               | 1,865 (1)                |
| $Y^{3+}$ | 3,46 —                   | —           |               |                          |
|          | 2·3,09 —                 | 4·3,79      |               |                          |
|          | 4·2,357 (1)              | 2·2,436 (1) |               |                          |

Межатомные углы

| Конфигурация                                  | Угол, град |
|-----------------------------------------------|------------|
| $Fe^{3+} [a] - O^{2-} - Fe^{3+} (d)$          | 125,9 (1)  |
| $Fe^{3+} [a] - O^{2-} - Y^{3+} *1$            | 101,5 (1)  |
| $Fe^{3+} [a] - O^{2-} - Y^{3+} *2$            | 104,3 (1)  |
| $Fe^{3+} (d) - O^{2-} - Y^{3+} *1$            | 123,0 (1)  |
| $Fe^{3+} (d) - O^{2-} - Y^{3+} *2$            | 93,5 (1)   |
| $Y^{3+} - O^{2-} - Y^{3+}$                    | 104,5 (1)  |
| $Fe^{3+} [a] - O^{2-} - Fe^{3+} [a] (4,41)*3$ | 147,2      |
| $Fe^{3+} (d) - O^{2-} - Fe^{3+} (d) (3,41)*3$ | 86,6       |
| $Fe^{3+} (d) - O^{2-} - Fe^{3+} (d) (3,68)*3$ | 78,8       |
| $Fe^{3+} (d) - O^{2-} - Fe^{3+} (d) (3,83)*3$ | 74,7       |
| $Fe^{3+} (d) - O^{2-} - Fe^{3+} (d) (3,83)*3$ | 74,6       |

\*1  $Y^{3+} - O^{2-}$ , расстояние  $2,436 \cdot 10^{-1}$  нм.

\*2 Такая же связь, расстояние  $2,357 \cdot 10^{-1}$  нм.

\*3 Значения в скобках — наибольшие расстояния  $Fe^{3+}$  ( $a$  или  $d$ ) —  $O^{2-}$  в единицах  $10^{-1}$  нм.

Таблица 29.12. Ионный радиус  $R^{3+}$  (координация 8), параметр элементарной ячейки  $a$  и рентгеновская плотность  $d_X$  ферритов-гранатов  $R_3Fe_5O_{12}$  [116—117]

Продолжение табл. 29.12

| Феррит-гранат    | Ионный радиус $R^{3+}$ , $10^{-1}$ нм | $a$ , $10^{-1}$ нм | $d_X$ , г/см <sup>3</sup> |
|------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| $Tb_3Fe_5O_{12}$ | 1,044                                 | 12,436             | 6,55                      |
| $Dy_3Fe_5O_{12}$ | 1,030                                 | 12,405             | 6,61                      |
| $Y_3Fe_5O_{12}$  | 1,016                                 | 12,376             | 5,17                      |
| $Ho_3Fe_5O_{12}$ | 1,017                                 | 12,375             | 6,77                      |
| $Er_3Fe_5O_{12}$ | 1,004                                 | 12,347             | 6,87                      |
| $Tm_3Fe_5O_{12}$ | 0,991                                 | 12,323             | 6,94                      |
| $Yb_3Fe_5O_{12}$ | 0,982                                 | 12,302             | 7,06                      |
| $Lu_3Fe_5O_{12}$ | 0,972                                 | 12,283             | 7,14                      |
| $La_3Fe_5O_{12}$ | 1,190                                 | (12,767)*1         | (5,67)*1                  |
| $Pr_3Fe_5O_{12}$ | 1,137                                 | (12,646)*1         | (5,87)*1                  |
| $Nd_3Fe_5O_{12}$ | 1,120                                 | (12,600)*1         | (6,00)*1                  |
| $Gd_3Fe_5O_{12}$ | 1,087                                 | 12,529             | 6,23                      |
| $Eu_3Fe_5O_{12}$ | 1,073                                 | 12,498             | 6,31                      |
| $Gd_3Fe_5O_{12}$ | 1,061                                 | 12,471             | 6,46                      |

\*1 Аппроксимированное значение.

Таблица 29.13. Межионные расстояния,  $10^{-1}$  нм, до ближайших соседей при 673 К из данных по дифракции нейтронов [118]

| Составляющие граната   | Гранат     |            |           |            |            |           |
|------------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|
|                        | Tb         | Dy         | Ho        | Er         | Tm         | Yb        |
| $R^{3+} - O^{2-}$      | 2,371 (7)  | 2,360 (11) | 2,362 (5) | 2,351 (10) | 2,340 (15) | 2,336 (6) |
| $R^{3+} - O^{2-}$      | 2,464 (7)  | 2,441 (11) | 2,436 (5) | 2,415 (10) | 2,424 (15) | 2,410 (6) |
| $Fe^{3+} [a] - O^{2-}$ | 2,025 (12) | 2,030 (15) | 2,018 (9) | 2,019 (12) | 2,007 (16) | 2,025 (8) |
| $Fe^{3+} (d) - O^{2-}$ | 1,862 (12) | 1,864 (12) | 1,860 (9) | 1,868 (12) | 1,863 (18) | 1,850 (9) |

Примечание. В скобках указана погрешность в последней цифре.

Таблица 29.14. Вхождение различных ионов в  $Y_3Fe_5O_{12}$

Ионные радиусы  $R_{II}$  ( $10^{-1}$  нм),  $x_{max}$  — максимальное вхождение на формульную единицу, предпочтение для различных кристаллографических позиций [119]

| Тетраэдрические d-позиции |          |               |               | Октаэдрические a-позиции |          |                   |                    | Додекаэдрические c-позиции |          |                 |           |
|---------------------------|----------|---------------|---------------|--------------------------|----------|-------------------|--------------------|----------------------------|----------|-----------------|-----------|
| Ион                       | $R_{II}$ | $x_{max}$     | $a^*$         | Ион                      | $R_{II}$ | $x_{max}$         | $a^*$              | Ион                        | $R_{II}$ | $x_{max}$       | $a^*$     |
| $Fe^{3+}$                 | 0,492    | 3             | —             | $Fe^{3+}$                | 0,642    | 2                 | —                  | $Y^{3+}$                   | 1,016    | 3               | —         |
| $B^{3+}$                  | 0,11(?)  | ?             | —             |                          |          |                   |                    | ( $Mg^{2+}$ )              | 0,89     | ?               | $Si^{4+}$ |
| $Si^{4+}$                 | 0,26     | 3             | $Ca^{2+}$     |                          |          |                   |                    | $Mn^{2+}$                  | 0,96     | ?               | $Ge^{4+}$ |
| $Be^{2+}$                 | 0,27     | $>0,1(?)$     | $Fe^{4+}$     |                          |          |                   |                    | $Lu^{3+}$                  | 0,972    | 3               | —         |
| $V^{5+}$                  | 0,355    | 1,5           | $Ca^{2+}$     | $Mn^{4+}$                | 0,530    | ?                 | —                  | $Yb^{3+}$                  | 0,982    | 3               | —         |
| $Ge^{4+}$                 | 0,390    | $<3$          | $Ca^{2+}$     | ( $Ge^{4+}$ )            | 0,530    | ?                 | $Ca^{2+}$          |                            |          |                 |           |
| $Al^{3+}$                 | 0,390    | 3             | —             | ( $Al^{3+}$ )            | 0,539    | 2                 | —                  |                            |          |                 |           |
|                           |          |               |               | ( $Te^{6+}$ )            | 0,56     | 0,25              | $Ca^{2+}$          |                            |          |                 |           |
| ( $Ti^{4+}$ )             | 0,42     | $\approx 0,2$ | $Ca^{2+}$     | $Ti^{4+}$                | 0,582    | $\approx 0,5$     | $Ca^{2+}$          | $Tb^{3+}$                  | 1,044    | 3               | —         |
| $Ga^{3+}$                 | 0,470    | 3             | —             | ( $Ga^{3+}$ )            | 0,610    | 2                 | —                  | $Gd^{3+}$                  | 1,061    | 3               | —         |
| ( $Sn^{4+}$ )             | 0,55     | $<1,0$        | $Ca^{2+}$     | $Sn^{4+}$                | 0,708    | 2                 | $Ca^{2+}$          | $Eu^{3+}$                  | 1,073    | 3               | —         |
| ( $Co^{2+}$ )             | 0,58     | $\approx 0,5$ | $Ge^{4+}$     | $Co^{2+}$                | 0,745    | 2                 | $Ge^{4+}$          | $Sm^{3+}$                  | 1,087    | 3               | —         |
| $Fe^{4+}$                 | (0,585)  | 0,1           | $Ca^{2+}$     | $Sb^{5+}$                | 0,616    | 2                 | $Ca^{2+}, Na^+$    | $Th^{4+}$                  | 1,095    | $\approx 0,9$   | $Ca^{2+}$ |
|                           |          |               |               | $Cr^{3+}$                | 0,615    | $\approx 0,6$     | —                  | $Cd^{2+}$                  | 1,10     | 3               | $Ge^{4+}$ |
| ( $Zn^{2+}$ )             | 0,60     | 0,7           | $F^-$         | $Zn^{2+}$                | 0,740    | 2                 | $Ge^{4+}$          | $Nd^{3+}$                  | 1,120    | $\approx 1,8$   | —         |
| ( $Ir^{4+}$ )             | 0,625    | ?             | ( $Fe^{2+}$ ) | $Ir^{4+}$                | 0,625    | $>0,05(?)$        | $Ca^{2+}, Mg^{2+}$ | $Ca^{2+}$                  | 1,124    | 3               | $V^{5+}$  |
|                           |          |               |               | $Mn^{3+}$                | 0,645    | $\approx 0,65(?)$ | —                  | $B^{3+}$                   | 1,132    | 1,2—1,9         | —         |
| $Fe^{2+}$                 | 0,63     | 1             | $F^-$         | $Fe^{2+}$                | 0,730    | $\approx 0,45$    | $Si^{4+}$          | $Pr^{3+}$                  | 1,137    | $\approx 1,1$   | —         |
| ( $Ru^{3+}$ )             | 0,68     | ?             | —             | $Ru^{3+}$                | 0,680    | $>0,02(?)$        | —                  | $Ce^{3+}$                  | 1,143    | $\approx 0,13?$ | —         |
|                           |          |               |               | $Ni^{2+}$                | 0,690    | $\approx 1,5$     | $Ge^{4+}$          | $Na^+$                     | 1,18     | 3               | $Te^{6+}$ |
|                           |          |               |               | $Hf^{4+}$                | 0,710    | 2                 | $Ca^{2+}$          | $La^{3+}$                  | 1,190    | 0,45            | —         |
|                           |          |               |               | $Mg^{2+}$                | 0,720    | $\approx 1,8$     | $Si^{4+}$          | $Sr^{2+}$                  | 1,240    | $\approx 1,0$   | $Sn^{4+}$ |
|                           |          |               |               | $Cu^{2+}$                | 0,730    | $<0,2(?)$         | $Ge^{2+}$          | $Pb^{2+}$                  | 1,29     | 1(?)            | $Ge^{4+}$ |
|                           |          |               |               | $Zr^{4+}$                | 0,745    | 2                 | $Ca^{2+}$          |                            |          |                 |           |
|                           |          |               |               | $Sc^{3+}$                | 0,745    | $\approx 1,5-1,6$ | —                  |                            |          |                 |           |
|                           |          |               |               | $In^{3+}$                | 0,792    | $\approx 0,9-1,0$ | —                  |                            |          |                 |           |
|                           |          |               |               | $Mn^{2+}$                | 0,830    | $\approx 0,4$     | $Si^{4+}$          |                            |          |                 |           |

Примечание.  $a^*$  — ионы, не используемые для компенсации заряда.

Таблица 29.15. Температура Кюри, температура компенсации [119] и намагниченность насыщения [120] редкоземельных ферритов-гранатов при температуре 295 К

| Гранат           | $T_C$ , К | $T_{\text{КОМП}}$ , К | $M_0$ , $10^3/(4\pi)$ А/м |
|------------------|-----------|-----------------------|---------------------------|
| $Y_3Fe_5O_{12}$  | 558,9     | —                     | 1750                      |
| $Sm_3Fe_5O_{12}$ | 573,4     | —                     | 1675                      |
| $Eu_3Fe_5O_{12}$ | 562,4     | —                     | 1170                      |
| $Gd_3Fe_5O_{12}$ | 566       | 285,5                 | 56                        |
| $Tb_3Fe_5O_{12}$ | 568       | 248,6                 | 198                       |
| $Dy_3Fe_5O_{12}$ | 553       | 230,2                 | 376                       |
| $Ho_3Fe_5O_{12}$ | 553       | 132,2                 | 880                       |
| $Er_3Fe_5O_{12}$ | 566       | 83                    | 1240                      |
| $Tu_3Fe_5O_{12}$ | 548       | 7,6                   | 1397                      |
| $Yb_3Fe_5O_{12}$ | 549       | <20                   | 1555                      |
| $Lu_3Fe_5O_{12}$ | 529,7     | —                     | 1815                      |

Продолжение табл. 29.1

| Феррит-гранат    | $T$ , К | $K_1$ , $10^4$ Дж/м <sup>3</sup> | $K_2$ , $10^4$ Дж/м <sup>3</sup> |
|------------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| $Sm_3Fe_5O_{12}$ | 300     | —17 ÷ —18,2                      | —                                |
|                  | 77      | —1430                            | 2100                             |
| $Eu_3Fe_5O_{12}$ | 4,2     | —4000                            | —                                |
|                  | 293     | —38                              | —                                |
| $Gd_3Fe_5O_{12}$ | 4,2     | —400                             | —156                             |
|                  | 320     | —4,1                             | —1,0                             |
| $Tb_3Fe_5O_{12}$ | 80      | —44                              | —3,5                             |
|                  | 4,2     | —241                             | —3,7                             |
| $Dy_3Fe_5O_{12}$ | 300     | —8,2                             | —                                |
|                  | 80      | —760                             | —7600                            |
| $Ho_3Fe_5O_{12}$ | 78      | +480                             | —4900                            |
|                  | 300     | < —5                             | —                                |
| $Er_3Fe_5O_{12}$ | 80      | —970                             | 214                              |
|                  | 300     | < —5                             | —                                |
| $Tm_3Fe_5O_{12}$ | 80      | —800                             | —270                             |
|                  | 4,2     | —30000                           | —                                |
| $Yb_3Fe_5O_{12}$ | 300     | —6,0                             | —                                |
|                  | 110     | —22,0                            | —                                |
| $Lu_3Fe_5O_{12}$ | 77      | 36 (+45)                         | —                                |
|                  | 4,2     | 9000                             | 50 000                           |
| $Yb_3Fe_5O_{12}$ | 293     | —5,8(—11)                        | 0                                |
|                  | 77      | —29,8(—210)                      | 100                              |
| $Yb_3Fe_5O_{12}$ | 300     | —6,1                             | —                                |
|                  | 80      | —38,5                            | —                                |
| $Yb_3Fe_5O_{12}$ | 4,2     | —6700                            | —                                |

Таблица 29.16. Значения констант анизотропии различных редкоземельных ферритов-гранатов [119]

| Феррит-гранат   | $T$ , К | $K_1$ , $10^4$ Дж/м <sup>3</sup> | $K_2$ , $10^4$ Дж/м <sup>3</sup> |
|-----------------|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| $Y_3Fe_5O_{12}$ | 295     | —5,7 ÷ —6,3                      | —2,3                             |
|                 | 273     | —7,8                             | —0,26                            |
|                 | 77      | —22,1                            | —2,1                             |
|                 | 4,2     | —24,8                            | —2,3                             |
|                 | 4,2     | —26,3                            | —1,2                             |

Таблица 29.17. Поля и константы магнитной кристаллографической анизотропии ферритов-гранатов при температуре 20° С

| Феррит-гранат                                     | $M_0$             | $K_1/M_0$         | $K_2/M_0$                | $K_1$ | $K_2$ | Литература |
|---------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------|-------|------------|
|                                                   | $10^3/(4\pi)$ А/м | $10^3/(4\pi)$ А/м | $10^2$ Дж/м <sup>3</sup> |       |       |            |
| $Bi_{0,8}Ca_{2,2}Fe_{3,9}V_{1,1}O_{12}$           | 180               | —240              | —5                       | —3,44 | —0,07 | [121]      |
| $Bi_{0,5}Ca_{2,5}Fe_{3,75}V_{1,25}O_{12}$         | 400               | —50               | —4                       | —1,59 | —0,1  | [121]      |
| $Bi_{0,2}Ca_{2,8}Fe_{3,6}V_{1,4}O_{12}$           | 630               | —22               | —2                       | —1,10 | —0,1  | [121]      |
| $Ca_3Fe_{3,5}V_{1,5}O_{12}$                       | 750               | —16               | —1                       | 0,96  | —0,06 | [122]      |
| $Bi_{0,4}Ca_{2,6}Fe_{3,6}V_{1,3}In_{0,1}O_{12}$   | 330               | —38               | —2                       | —1,0  | —0,05 | [122]      |
| $Bi_{0,4}Ca_{2,6}Fe_{3,45}V_{1,3}In_{0,25}O_{12}$ | 80                | —55               | —4                       | —0,35 | —0,02 | [122]      |
| $Bi_{0,2}Ca_{2,8}Fe_{3,5}V_{1,4}Sc_{0,1}O_{12}$   | 470               | —28               | —2                       | —1,05 | —0,07 | [122]      |
| $Bi_{0,2}Ca_{2,8}Fe_{3,35}V_{1,4}Sc_{0,25}O_{12}$ | 230               | —25               | —3                       | —0,46 | —0,05 | [122]      |
| $Ca_3Fe_{3,4}V_{1,5}Sc_{0,1}O_{12}$               | 600               | —16               | —1                       | —0,76 | —0,05 | [122]      |
| $Ca_3Fe_{3,25}V_{1,5}Sc_{0,25}O_{12}$             | 380               | —14               | —2                       | —0,42 | —0,06 | [122]      |
| $Ca_3Fe_{3,1}V_{1,5}Sc_{0,4}O_{12}$               | 150               | —10               | —4                       | —0,12 | —0,05 | [122]      |

Т а б л и ц а 29. 18. Значения магнитоупругих и магнитострикционных коэффициентов некоторых ферритов-гранатов

| Феррит-гранат                                                                | $B_1, 10^6 \text{ Дж/м}^3$ |       | $B_2, 10^5 \text{ Дж/м}^3$ |      | $\lambda_{100}, 10^{-6}$ |       | $\lambda_{111}, 10^{-6}$ |       | Литера-тура |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|-------------|
|                                                                              | 300 К                      | 77 К  | 300 К                      | 77 К | 300 К                    | 77 К  | 300 К                    | 77 К  |             |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$                                         | 3,4                        | 1,7   | 6,4                        | 12,7 | -1,4                     | -0,7  | -2,4                     | -5,3  | [123]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,8}\text{Ga}_{0,2}\text{O}_{12}$                      | 3,0                        | 2,6   | 6,0                        | 12,5 | -1,15                    | -1,0  | -2,1                     | -4,3  | [124]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,2}\text{Ga}_{0,8}\text{O}_{12}$                      | 2,2                        | 2,6   | 2,86                       | 6,0  | -0,85                    | -1,0  | -1,0                     | -2,1  | [124]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{3,66}\text{Ga}_{1,34}\text{O}_{12}$                    | 0,4                        | 1,75  | 0,57                       | 2,36 | -0,15                    | -0,67 | -0,2                     | -0,82 | [124]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,81}\text{Al}_{0,19}\text{O}_{12}$                    | —                          | —     | —                          | —    | -0,2                     | -1,45 | -3,45                    | -6,1  | [125]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,25}\text{Al}_{0,75}\text{O}_{12}$                    | —                          | —     | —                          | —    | -1,2                     | -2,2  | -2,0                     | -4,8  | [125]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,52}\text{Sc}_{0,48}\text{O}_{12}$                    | 2,3                        | -4,55 | 4,0                        | 8,9  | -0,91                    | 1,75  | -1,4                     | -3,2  | [125]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,3}\text{Sc}_{0,7}\text{O}_{12}$                      | 1,2                        | -5,5  | 1,9                        | 4,2  | -0,45                    | 2,1   | -0,67                    | -1,45 | [125]       |
| $\text{Bi}_{0,5}\text{Ca}_{2,5}\text{Fe}_{3,75}\text{V}_{1,25}\text{O}_{12}$ | 4,4                        | 7,6   | 2,0                        | 3,7  | -2,6                     | -4,5  | -1,2                     | -2,5  | [126]       |
| $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$                                        | —                          | —     | —                          | —    | 0                        | 7,1   | -3,1                     | -3,9  | [127]       |

Т а б л и ц а 29.19. Поля и константы магнитной кристаллографической анизотропии иттриевых ферритов-гранатов при температуре 20° С [121—129]

| Феррит-гранат                                                            | $M_0, 10^{19} \text{ э.в.}/(4\pi) \text{ А/м}$ | $K_1/M_0$                 | $K_2/M_0$ | $K_1$                 | $K_2$ |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------|-------|
|                                                                          |                                                | $10^8/(4\pi) \text{ А/м}$ |           | $10^8 \text{ Дж/м}^3$ |       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$                                     | 1750                                           | -42                       | 0         | 6,0                   | 0     |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,4}\text{Fe}_{4,6}\text{O}_{12}$                  | 1150                                           | -42                       | 0         | 3,94                  | 0     |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,6}\text{Fe}_{4,4}\text{O}_{12}$                  | 850                                            | -45                       | 0         | 3,05                  | 0     |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,8}\text{Fe}_{4,2}\text{O}_{12}$                  | 600                                            | -53                       | 0         | 2,53                  | 0     |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{1,0}\text{Fe}_{4,0}\text{O}_{12}$                  | 300                                            | -62                       | 0         | 1,48                  | 0     |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{1,2}\text{Fe}_{3,8}\text{O}_{12}$                  | 100                                            | -96                       | 0         | 0,76                  | 0     |
| $\text{Y}_3\text{In}_{0,2}\text{Fe}_{4,8}\text{O}_{12}$                  | 1850                                           | -22                       | 0         | 3,24                  | 0     |
| $\text{Y}_3\text{In}_{0,4}\text{Fe}_{4,6}\text{O}_{12}$                  | 1820                                           | -12                       | -1        | 1,74                  | 0,1   |
| $\text{Y}_3\text{In}_{0,55}\text{Fe}_{4,45}\text{O}_{12}$                | 1750                                           | -7                        | -1        | 0,97                  | 0,1   |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,15}\text{Fe}_{4,25}\text{O}_{12}$ | 900                                            | -21                       | 0         | 1,50                  | 0     |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,3}\text{Fe}_{4,1}\text{O}_{12}$   | 930                                            | -16                       | -1        | 1,18                  | 0,05  |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,48}\text{Fe}_{3,92}\text{O}_{12}$ | 950                                            | -5                        | -1        | 0,38                  | 0,06  |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,15}\text{Fe}_{3,95}\text{O}_{12}$ | 460                                            | -23                       | -1        | 0,84                  | 0,03  |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,3}\text{Fe}_{3,8}\text{O}_{12}$   | 500                                            | -18                       | -2        | 0,72                  | 0,05  |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,48}\text{Fe}_{3,62}\text{O}_{12}$ | 570                                            | -6                        | -2        | 0,27                  | 0,07  |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{1,1}\text{In}_{0,3}\text{Fe}_{3,6}\text{O}_{12}$   | 300                                            | -24                       | -2        | 0,57                  | 0,04  |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_{1,1}\text{In}_{0,48}\text{Fe}_{3,42}\text{O}_{12}$ | 420                                            | -10                       | -2        | 0,33                  | 0,06  |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,995}\text{Co}_{0,005}\text{O}_{12}$              | 1750                                           | -20                       | -10       | -2,79                 | -1,39 |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,99}\text{Co}_{0,01}\text{O}_{12}$                | 1750                                           | 5                         | -23       | 0,70                  | -3,20 |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,97}\text{Co}_{0,03}\text{O}_{12}$                | 1750                                           | 105                       | -63       | 14,63                 | -8,78 |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,98}\text{Si}_{0,02}\text{O}_{12}$                | 1750                                           | -32                       | -4        | -4,46                 | -0,56 |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,95}\text{Si}_{0,05}\text{O}_{12}$                | 1700                                           | -16                       | -8        | -2,17                 | -1,08 |

Т а б л и ц а 29.20. Степенной закон для температурной зависимости намагниченности подрешеток  $M_i(T)/M_i(0\text{К}) = D(1 - T/T_C)^\beta$  значения параметров  $D$  и  $\beta$  для  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  [130—131]

| Кристалло-графическая позиция | $\beta$           | $D$             | Температурный интервал        |
|-------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|
| [a]                           | $0,323 \pm 0,005$ | $1,18 \pm 0,02$ | $0,65 \leq T/T_C \leq 0,97$   |
| Октаэдр                       | $0,40 \pm 0,03$   | $1,55 \pm 0,20$ | $0,97 \leq T/T_C \leq 0,9985$ |
| (d)                           | $0,349 \pm 0,005$ | $1,09 \pm 0,02$ | $0,65 \leq T/T_C \leq 0,99$   |
| Тетраэдр                      | $0,47 \pm 0,03$   | $1,95 \pm 0,20$ | $0,99 \leq T/T_C \leq 0,9997$ |

Т а б л и ц а 29.21. Коэффициенты упругой жесткости кристаллов,  $10^{10} \text{ Па}$  ( $10^{11} \text{ дин/см}^2$ ), при температуре 300 К

| Феррит-гранат                                             | $c_{11}$ | $c_{12}$ | $c_{44}$ | Литера-тура |
|-----------------------------------------------------------|----------|----------|----------|-------------|
| $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$                      | 26,90    | 10,77    | 7,64     | [132]       |
| $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$                     | 25,10    | 10,70    | 7,62     | [133]       |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$                      | 29,03    | 11,73    | 9,55     | [134]       |
| $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$                      | 33,40    | 11,12    | 11,51    | [135]       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_{2,66}\text{Ga}_{2,34}\text{O}_{12}$ | 28,47    | 11,81    | 8,36     | [136]       |

Таблица 29.22. Кубические коэффициенты упругой жесткости,  $10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, гранатов, не содержащих железа, при температуре 20 °С

| Гранат                           | $c_{11}$    | $c_{44}$    | $c_{12}$    | $A_I^{*1}$ | Литература |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| $Y_3Al_5O_{12}$                  | 33,32—33,40 | 11,50—11,51 | 11,07—11,12 | 1,033      | [139]      |
| $Y_3Ga_5O_{12}$                  | 29,03       | 9,547       | 11,73       | 1,10       | [136]      |
| $Gd_3Ga_5O_{12}$                 | 28,703      | 9,04        | 11,601      | 1,057      | [137]      |
| $Gd_3Ga_5O_{12}$ [100]           | 28,57       | 9,02        | 11,49       | 1,056      | [138]      |
| $Gd_3Ga_5O_{12}$ [110]           | 28,59       | 9,03        | 11,49       | 1,056      | [138]      |
| $Gd_3Ga_5O_{12}$ [ $\bar{1}10$ ] | 28,51       | 9,02        | 11,45       | 1,057      | [138]      |
| $Sm_3Ga_5O_{12}$                 | 28,076      | 8,604       | 11,352      | 1,029      | [140]      |
| $Nd_3Ga_5O_{12}$                 | 27,781      | 8,381       | 11,155      | 1,008      | [141]      |

\*1  $A_I = 2c_{44}/(c_{11} - c_{12})$  — коэффициент упругой анизотропии.

Таблица 29.23. Средние значения микротвердости,  $10^5$  Па, для плоскостей (110) и (211) и значения класса твердости для  $Y_3Fe_5O_{12}$ ,  $Y_3Ga_5O_{12}$  и  $Y_3Al_5O_{12}$  [142—143]

| Гранат          | Плоскость                                              |               | Средняя микро-<br>твердость кристалла | Класс твердости<br>по расширенной<br>15-точечной шкале<br>Мооса |
|-----------------|--------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                 | (110)                                                  | (211)         |                                       |                                                                 |
| $Y_3Fe_5O_{12}$ | $\begin{cases} 1210 \pm 35 \\ 1400 \pm 35 \end{cases}$ | $1240 \pm 50$ | 1230                                  | 7,5                                                             |
| $Y_3Ga_5O_{12}$ | $1450 \pm 45$                                          | $1520 \pm 75$ | 1490                                  | 8,0                                                             |
| $Y_3Al_5O_{12}$ | $1900 \pm 50$                                          | $1650 \pm 85$ | 1730                                  | 8,4                                                             |

Таблица 29.24. Характерные дислокации в  $Y_3Fe_5O_{12}$ , выявленные поляризационно-оптическим методом [144]

| Ось дислокации                        | [110] |       |       |       |       | [211] |       |       |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Плоскость скольжения                  | (001) | (110) |       | (112) | (111) |       | (311) |       |
| Вероятное направление вектора Бюргера | [110] | [100] | [111] | [100] | [111] | [110] | [110] | [110] |
| Тип дислокаций, град                  | 90    | 45    | 35    | 90    | 90    | 90    | 30    | 72    |



Таблица 29.25. Температура Дебая  $\theta_D$  и экстраполированный к  $\theta_D$  коэффициент теплопроводности  $\kappa$  при этой температуре для различных гранатов [145]

В скобках даны расчетные значения

| Гранат          | R  | $\theta_D$ , К | $\kappa$ , Вт/(см·К) |
|-----------------|----|----------------|----------------------|
| $R_3Al_5O_{12}$ | Y  | 750            | 0,042                |
|                 | Gd | (640)          | 0,045                |
|                 | Er | 630            | —                    |
|                 | Tm | 620            | —                    |
|                 | Tb | 620            | —                    |
|                 | Lu | (620)          | 0,043                |
| $R_3Ga_5O_{12}$ | Nd | 715            | —                    |
|                 | Yb | 715            | 0,039                |
|                 | Y  | 585            | 0,046                |
|                 | Gd | 520            | 0,051                |
| $R_3Fe_5O_{12}$ | Y  | —              | 0,038                |
|                 | Eu | —              | —                    |
|                 | Lu | —              | —                    |

Таблица 29.26. Коэффициент теплопроводности для  $Y_3Fe_5O_{12}$  [145] в зависимости от температуры

| T, К | $\kappa$ , Вт/(см·К) | T, К | $\kappa$ , Вт/(см·К) |
|------|----------------------|------|----------------------|
| 2,5  | 0,075                | 70   | 0,41                 |
| 6    | 0,56                 | 100  | 0,26                 |
| 10   | 1,2                  | 150  | 0,150                |
| 21   | 2,2*1                | 200  | 0,106                |
| 30   | 1,80                 | 300  | 0,074                |
| 40   | 1,12                 | 565  | 0,038*2              |
| 50   | 0,63                 |      |                      |

\*1 Максимальное значение.

\*2 Экстраполированное значение.

Таблица 29.27. Коэффициент линейного расширения поликристаллических гранатов  $Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$  и  $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$  [146]

| Гранат                        | Коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $10^{-6}$ град $^{-1}$ |       |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------|
|                               | 298 К                                                              | 623 К |
| $Y_3Fe_5O_{12}$               | 8,30                                                               | 11,0  |
| $Y_{2,24}Gd_{0,76}Fe_5O_{12}$ | 8,00                                                               | 11,0  |
| $Y_{1,5}Gd_{1,5}Fe_5O_{12}$   | 8,10                                                               | 10,4  |
| $Y_3Fe_{4,7}Al_{0,3}O_{12}$   | 7,95                                                               | 10,0  |
| $Y_3Fe_{4,3}Al_{0,7}O_{12}$   | 8,10                                                               | 10,0  |
| $Y_3Fe_4Al_1O_{12}$           | 8,40                                                               | 11,1  |
| $Y_3Fe_{3,8}Al_{1,2}O_{12}$   | 8,30                                                               | 10,5  |

Таблица 29.28. Значения удельного сопротивления и диэлектрических потерь для граната  $Y_3Fe_5O_{12}$  [147—148]

| Измеренное значение | Частота, ГГц | Температура, К |
|---------------------|--------------|----------------|
|---------------------|--------------|----------------|

Поликристаллический образец

|                  |                     |   |     |
|------------------|---------------------|---|-----|
| $\epsilon'$      | 16,7                | 9 | 293 |
| $tg \delta^{1*}$ | $5 \cdot 10^{-5}$   | 9 | 293 |
|                  | $7,2 \cdot 10^{-5}$ | 9 | 373 |
|                  | $2,0 \cdot 10^{-4}$ | 9 | 473 |
|                  | $6,2 \cdot 10^{-4}$ | 9 | 573 |

Монокристаллический образец

|                |                     |   |     |
|----------------|---------------------|---|-----|
| $\rho$ , Ом·м: | $1,0 \cdot 10^{16}$ | 0 | 304 |
|                | $1,0 \cdot 10^7$    | 0 | 373 |
|                | $2,6 \cdot 10^3$    | 0 | 473 |
|                | $4,6 \cdot 10^2$    | 0 | 573 |

\*1 Погрешность  $\epsilon'' \pm 3 \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 29.29. Типичные значения магнитостатических параметров некоторых пленок ферритов-гранатов с цилиндрическими магнитными доменами [119]

$h$  — толщина пленки;  $l$  — характеристическая длина материала;  $H_{кол}$  — поле коллапса;  $\sigma_w$  — энергия доменной стенки;  $d_{кол}$  — диаметр коллапса;  $K_u$  — коэффициент одноосной анизотропии;  $\delta_w$  — ширина доменной стенки

| Состав материала                         | $4\pi M_s$ , $10^3/(4\pi)$ А/м | $h$ , мкм | $l$ , мкм | $\lambda \equiv l/h$ | $H_{кол}$ , 80 А/м |            | $d_{кол}$ , мкм |            | $\sigma_w$ , $10^{-3}$ Дж/м $^2$ | $K_u$ , $10^3$ Дж/м $^3$ | $\delta_w$ , мкм |
|------------------------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|----------------------|--------------------|------------|-----------------|------------|----------------------------------|--------------------------|------------------|
|                                          |                                |           |           |                      | наблю-даемое       | расчет-ное | наблю-даемое    | расчет-ное |                                  |                          |                  |
| $Gd_{1,5}Eu_{1,5}Fe_{4,5}Al_{0,5}O_{12}$ | 219                            | 16,0      | 1,78      | 0,111                | 160                | 111        | 6,0             | 8,6        | 0,68                             | 28,8                     | 0,018            |
| $Cd_{2,34}Tb_{0,66}Fe_5O_{12}$           | 137                            | 15,0      | 1,53      | 0,102                | 75                 | 72         | 7,5             | 7,6        | 0,23                             | 3,3                      | 0,054            |
| $Er_3Fe_{4,3}Ga_{0,7}O_{12}$             | 132                            | 4,4       | 1,50      | 0,341                | 32                 | 32         | 6,0             | 6,0        | 0,21                             | 2,8                      | 0,058            |
| $Er_2TbFe_{3,9}Al_{1,1}O_{12}$           | 136                            | 17,0      | 1,27      | 0,075                | 82                 | 79         | 7,0             | 7,0        | 0,19                             | 2,2                      | 0,067            |

| Состав материалов                                         | $\frac{4\pi M_s}{10^3/(4\pi)} \text{ А/м}$ | $h$ , мкм | $l$ , мкм | $\lambda$ м | $H_{\text{КОЛ}}$ , 80 А/м |                | $d_{\text{КОЛ}}$ , мкм |                | $\sigma_W$ , $10^{-3}$ Дж/м <sup>2</sup> | $K_H$ , $10^3$ Дж/м <sup>3</sup> | $\delta_W$ , мкм |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------|-----------|-------------|---------------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------------------------|------------------|
|                                                           |                                            |           |           |             | наблю-<br>даемое          | расчет-<br>ное | наблю-<br>даемое       | расчет-<br>ное |                                          |                                  |                  |
| $Y_{2,7}Sm_{0,3}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$                   | 128                                        | 5,2       | 0,87      | 0,167       | 56                        | 53             | —                      | 3,8            | 0,12                                     | 0,90                             | 0,099            |
| $Y_{1,52}Gd_{0,86}Yb_{0,62}Fe_{4,11}Ga_{0,89}O_{12}$      | 150                                        | 3,6       | 0,80      | 0,222       | —                         | 52             | —                      | 3,3            | 0,14                                     | 1,3                              | 0,086            |
| $Y_{1,53}Lu_{0,39}La_{0,06}CaFe_4GeO_{12}$                | 145                                        | 4,1       | 0,79      | 0,193       | 57                        | 56             | —                      | 3,4            | 0,12                                     | 0,59                             | 0,175            |
| $Y_{2,86}La_{0,14}Fe_{3,75}Ga_{1,25}O_{12}$               | 150                                        | 3,8       | 0,72      | 0,189       | 46                        | 58             | —                      | 3,0            | 0,13                                     | 1,0                              | 0,098            |
| $Eu_2ErFe_{4,3}Ga_{0,7}O_{12}^{*1}$                       | 173                                        | 6,0       | 0,70      | 0,117       | —                         | 86             | —                      | 3,4            | 0,17                                     | 1,8                              | 0,073            |
| $Y_{1,9}Sm_{0,1}CaFe_4GeO_{12}$                           | 163                                        | 4,0       | 0,66      | 0,165       | 70                        | 68             | —                      | 2,9            | 0,13                                     | 0,44                             | 0,249            |
| $Eu_2ErFe_{4,3}Ga_{0,7}O_{12}^{*2}$                       | 247                                        | 18,0      | 0,64      | 0,036       | 182                       | 172            | 5,0                    | 4,7            | 0,31                                     | 6,0                              | 0,040            |
| $Eu_{1,45}Ca_{1,1}Y_{0,45}Fe_{3,9}Si_{0,6}Ge_{0,5}O_{12}$ | 218                                        | 4,23      | 0,64      | 0,151       | 100                       | 96             | —                      | 2,9            | 0,25                                     | 1,3                              | 0,146            |
| $Y_{2,6}Sm_{0,4}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$                   | 240                                        | 2,8       | 0,63      | 0,225       | 64                        | 83             | —                      | 2,6            | 0,29                                     | 5,2                              | 0,044            |
| $Gd_2LuFe_{4,4}Al_{0,6}O_{12}$                            | 189                                        | 9,4       | 0,53      | 0,056       | —                         | 119            | —                      | 3,2            | 0,15                                     | 0,47                             | 0,130            |
| $Y_{1,03}Gd_{1,29}Yb_{0,68}Fe_{4,3}Al_{0,7}O_{12}$        | 175                                        | 2,1       | 0,51      | 0,243       | 70                        | 58             | —                      | 2,1            | 0,12                                     | 0,96                             | 0,101            |
| $Er_{1,3}Gd_{0,95}Tb_{0,75}Fe_{4,5}Al_{0,5}O_{12}$        | 181                                        | 11,5      | 0,35      | 0,030       | 140                       | 131            | 3,0                    | 2,7            | 0,091                                    | 0,52                             | 0,138            |
| $Y_{1,2}Lu_{0,65}Sm_{0,4}Fe_{4,1}(CaGe)_{0,9}O_{12}$      | 330                                        | 3,0       | 0,35      | 0,117       | —                         | 163            | —                      | 1,7            | 0,30                                     | 2,3                              | 0,104            |
| $Tm_{2,15}Eu_{0,85}Fe_{4,45}Ga_{0,55}O_{12}$              | 700                                        | 0,67      | 0,13      | 0,194       | 212                       | 268            | —                      | 0,55           | 0,50                                     | 5,35                             | 0,074            |
| $Lu_{1,6}Sm_{0,6}La_{0,2}Fe_{4,4}(CaGe)_{0,6}O_{12}$      | 784                                        | 1,1       | 0,12      | 0,109       | —                         | 400            | —                      | 0,59           | 0,58                                     | 7,06                             | 0,065            |
| $Lu_{1,8}Sm_{1,2}Fe_3O_{12}$                              | 1750                                       | 4,2       | 0,05      | 0,012       | —                         | 1435           | —                      | 0,58           | 1,25                                     | 30,4                             | 0,031            |
| $Tm_{2,18}Sm_{0,85}Fe_5O_{12}$                            | 1378                                       | 0,87      | 0,047     | 0,054       | 900                       | 879            | —                      | 2,9            | 0,71                                     | 18,1                             | 0,031            |

\*1 Пленка на подложке из гадолиний-галлиевого граната.

\*2 Менокристалл.

Таблица 29.30. Эффект Фарадея ( $\lambda = 1,152$  мкм) в некоторых ферритах-гранатах [150]

$$\Delta a = a_{\text{подложка}} - a_{\text{пленка}}$$

| Состав пленки                         | $\Delta a$ , $10^{-1}$ нм | $M_s$ , $10^3/(4\pi)$ А/м | $\theta_F$ , $10^2$ град/м | $\theta_F / M_s$ |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|
| $Y_3Fe_5O_{12}$                       | +0,004                    | 1780 ±                    | +250                       | 0,02             |
| $Bi_{0,1}Y_{2,9}Fe_5O_{12}$           | —0,010                    | 1750 ±                    | +150                       | 0,008            |
| $Bi_{0,45}Y_{2,55}Fe_4Ga_1O_{12}$     | —0,027                    | 310 ±                     | —340                       | 1,2              |
| $Y_3Fe_{4,75}Sc_{0,25}O_{12}$         | —0,021                    | 1780                      | +175                       | 0,01             |
| $Y_3Fe_{3,95}Sc_{0,25}Ga_{0,8}O_{12}$ | —0,012                    | 620                       | + 95                       | 0,02             |
| $Y_3Fe_{3,75}Sc_{0,25}Ga_{1,0}O_{12}$ | —0,009                    | 400                       | + 80                       | 0,04             |
| $Y_3Fe_{3,55}Sc_{0,25}Ga_{1,2}O_{12}$ | +0,002                    | 180                       | + 70                       | 0,14             |

Продолжение табл. 29.30

| Состав пленки                                  | $\Delta a$ , $10^{-1}$ нм | $M_s$ , $10^3/(4\pi)$ А/м | $\theta_F$ , $10^2$ град/м | $\theta_F / M_s$ |
|------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|
| $Gd_{0,6}Y_{2,4}Fe_{4,3}Ga_{0,7}O_{12}$        | —0,006                    | 450                       | +180                       | 0,16             |
| $Gd_{0,7}Y_{2,3}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$        | —0,013                    | 100                       | +140                       | 1,96             |
| $Gd_{0,7}Y_{2,3}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$        | —0,009                    | 30                        | + 53                       | 3,12             |
| $Yb_{2,6}Pr_{0,4}Fe_4Ga_1O_{12}$               | +0,022                    | 280                       | —123                       | 0,25             |
| $Yb_{2,3}Pr_{0,7}Fe_4Ga_1O_{12}$               | —0,017                    | 260                       | —125                       | 0,23             |
| $Yb_3Pr_1Fe_4Ga_1O_{12}$                       | —0,042                    | 386                       | —135                       | 0,12             |
| $(YbPr)_{2,5}Bi_{0,5}Fe_4Ga_1O_{12}$           | —0,031                    | 270                       | —675                       | 6,25             |
| $(YbPr)_{2,3}Bi_{0,7}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$   | —0,002                    | 150                       | —950                       | 40               |
| $(YbPr)_{2,1}Bi_{0,9}Fe_{3,85}Ga_{1,15}O_{12}$ | —0,019                    | 220                       | —1190                      | 30               |

Т а б л и ц а 29.31. Намагниченности иттриевого граната  $M_s$  и подрешеток  $M_a$  и  $M_d$  и обменные интегралы  $J_{ij}$  по результатам измерений различными методами [151]

| Метод                                                          | $4\pi M_s (295\text{K}),$<br>мТл | $\frac{M_s (295\text{ K})}{M_s (0\text{ K})}$ | $\frac{M_a (295\text{ K})}{M_a (0\text{ K})}$ | $\frac{M_d (295\text{ K})}{M_d (0\text{ K})}$ | $J_{ad}, \text{ см}^{-1}$ | $J_{dd}, \text{ см}^{-1}$ | $J_{aa}, \text{ см}^{-1}$ |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Ядерного магнитного резонанса [186]                            | —                                | 0,725                                         | 0,89                                          | 0,835                                         | —                         | —                         | —                         |
| То же [187]                                                    | —                                | 0,733                                         | 0,888                                         | 0,837                                         | —                         | —                         | —                         |
| » [188]                                                        | —                                | 0,730                                         | 0,895                                         | 0,84                                          | —                         | —                         | —                         |
| Дифракции нейтронов [189]                                      | —                                | 0,76                                          | 0,94                                          | 0,88                                          | —                         | —                         | —                         |
| Маятникового магнетометра [190]                                | 181,2                            | 0,734                                         | —                                             | —                                             | —                         | —                         | —                         |
| То же [191]                                                    | 179                              | 0,725                                         | —                                             | —                                             | —                         | —                         | —                         |
| Магнитных весов [192]                                          | 177                              | 0,717                                         | —                                             | —                                             | 25,36                     | 8,45                      | 11,86                     |
| Вибромагнетометра, магнито-статических мод, индукционный [193] | 180±1                            | 0,729                                         | —                                             | —                                             | —                         | —                         | —                         |
| Теории молекулярного поля [151]                                | 176,7                            | 0,729                                         | 0,896                                         | 0,84                                          | 25,64                     | 7,8                       | 11,0                      |
| Рассеяния нейтронов [191]                                      | —                                | —                                             | —                                             | —                                             | 27,24                     | 4,38                      | 13,07                     |

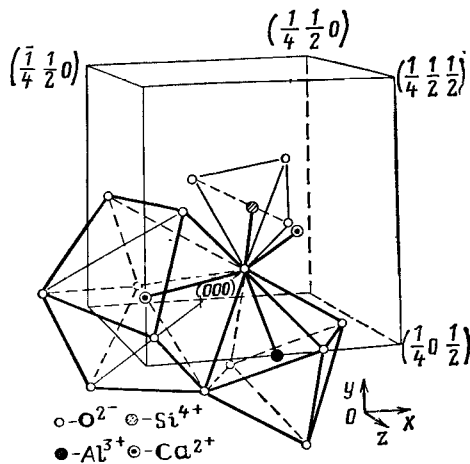


Рис. 29.20. Координации ионов в различных подрешетках в структуре граната  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  [152]

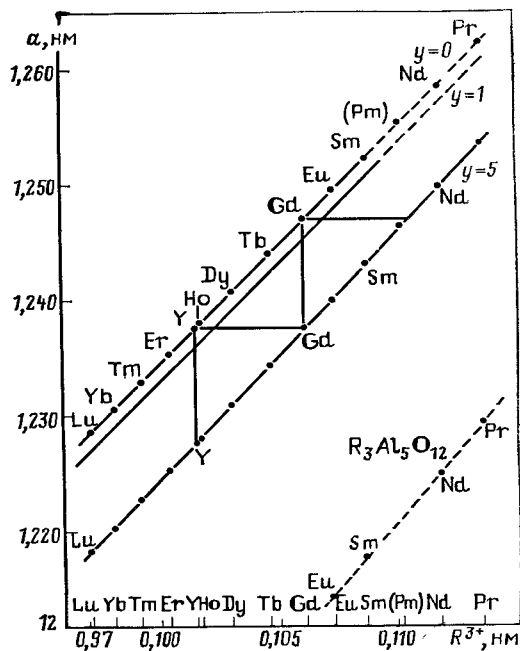


Рис. 29.21. Размеры элементарной ячейки ферритов-гранатов  $R_3\text{Fe}_{5-y}\text{Ga}_y\text{O}_{12}$ ;  $r_{\text{Fe}^{3+}}^{\text{VI}} = 6,42 \cdot 10^{-2}$  нм;  $r_{\text{Ga}^{3+}}^{\text{VI}} = 6,17 \times 10^{-2}$  нм;  $r_{\text{Al}^{3+}}^{\text{VI}} = 5,40 \cdot 10^{-2}$  нм;  $r_{\text{La}^{3+}}^{\text{VIII}} = 1,192 \cdot 10^{-2}$  нм [153]

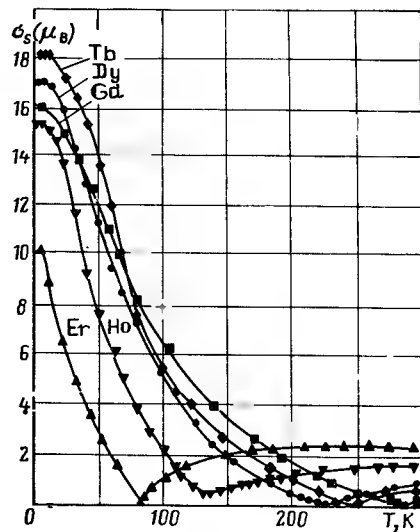


Рис. 29.22. Температурная зависимость спонтанной намагниченности в магнетонах Бора на формульную единицу в ферритах-гранатах Gd, Tb, Dy, Ho и Er [154]

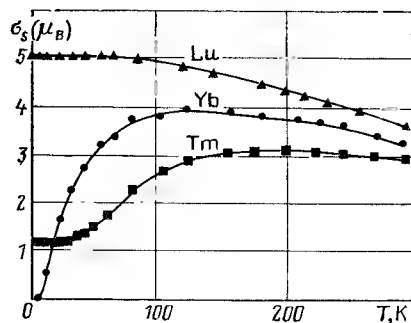


Рис. 29.23. Температурная зависимость спонтанной намагниченности в магнетонах Бора на формульную единицу в ферритах-гранатах Tm, Yb и Lu [154]

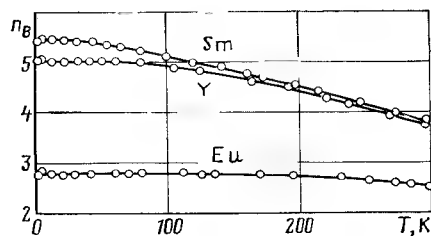


Рис. 29.24. Температурная зависимость намагниченности насыщения в магнетонах Бора на формульную единицу для монокристаллических образцов в форме сфер, имеющих возможность свободно вращаться во внешнем поле. Данные для иттриевого феррита-граната получены на поликристаллическом образце [155]

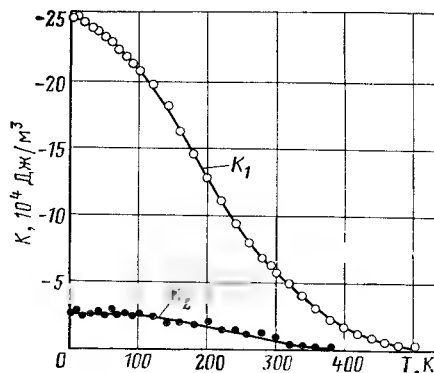


Рис. 29.25. Температурные зависимости первой и второй констант магнитной кристаллографической анизотропии в  $Y_3Fe_5O_{12}$  [156]. Значения  $K_2$  при низкой температуре сильно зависят от концентрации примесей, в особенности двухвалентного железа  $Fe^{2+}$

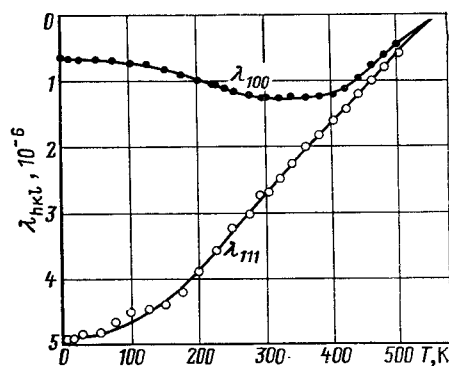


Рис. 29.26. Температурные зависимости магнитоstrictionных коэффициентов  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  в иттриевом феррите-гранате  $Y_3Fe_5O_{12}$  [157]



Рис. 29.27. Зависимость коэффициента поглощения ( $\lg \alpha$ ) от волнового числа в  $Y_3Fe_5O_{12}$ . В диапазоне от  $10\,000\text{ см}^{-1}$  до  $40\,000\text{ см}^{-1}$  данные приведены при температуре 77 К. Полосы фонового поглощения показаны схематически [158]

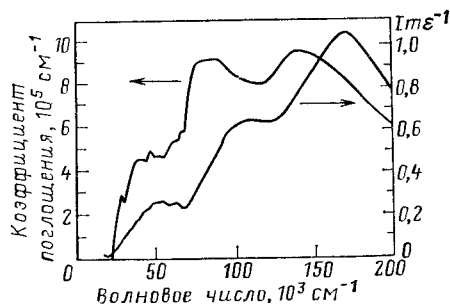


Рис. 29.28. Коэффициент поглощения  $Y_3Fe_5O_{12}$  при высоких энергиях [159]

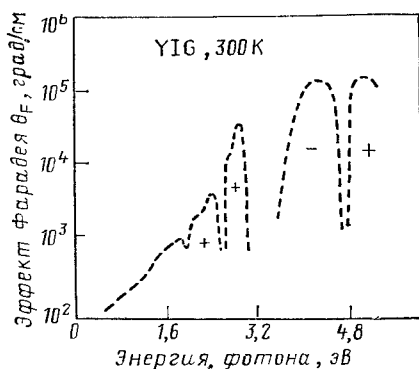


Рис. 29.29. Эффект Фарадея в иттриевом феррите-гранате  $Y_3Fe_5O_{12}$  [160]

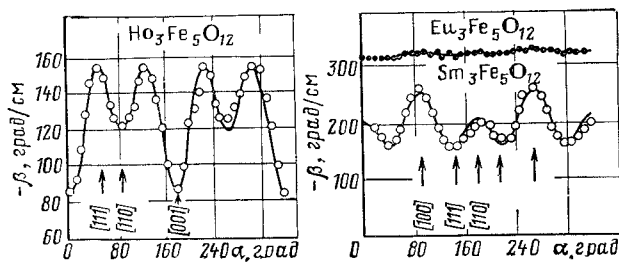


Рис. 29.30. Анизотропия магнитного линейного дупре-ломления на волне  $\lambda = 1,15$  мкм при  $T = 300$  К в ферритах-гранатах гольмия, европия и самария [161]

## 29.4. ГЕКСАГОНАЛЬНЫЕ ФЕРРИТЫ

Большая группа ферромагнитных оксидов обладает гексагональной кристаллической структурой. На рис. 29.31 приведена диаграмма, на которой указаны химические составы таких веществ. В углах расположены соединения  $BaO$ ,  $MeO$  и  $Fe_2O_3$ . Символ  $Me$  означает двухвалентный ион первой переходной группы или ионы  $Zn^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , а также комбинацию этих ионов

(например,  $Li^+$  и  $Fe^{3+}$ ). На линии диаграммы, соединяющей  $BaO$  и  $Fe_2O_3$ , отмечена точка, соответствующая антиферромагнитному бариевому ферриту  $BaFe_2O_4$ . Точка  $S$  на линии  $MeO - Fe_2O_3$  соответствует соединению  $Me_2Fe_4O_8$  с кубической кристаллической структурой типа шпинели. Точка  $M$  отвечает оксиду, имеющему гексагональную структуру и химический состав  $BaFe_{12}O_{19} = BaO \cdot 6Fe_2O_3$ . Точка  $Y$  на диаграмме соответствует соединению  $Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22} = 2(BaO \cdot MeO \cdot 3Fe_2O_3)$ .

Известно также большое число соединений с составами, лежащими на линиях  $M-S$  и  $M-Y$ , а элементарная ячейка этих соединений может быть легко построена из ячеек структуры  $S$ ,  $M$  и  $Y$ . В большинстве случаев ион  $Ba^{2+}$  ( $r = 0,143$  нм) может быть частично или полностью замещен ионами  $Ca^{2+}$  ( $r = 0,106$  нм),  $Sr^{2+}$  ( $r = 0,127$  нм) или  $Pb^{2+}$  ( $r = 0,132$  нм) или трехвалентными ионами, например  $La^{3+}$  ( $r = 0,122$  нм).

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии гексагональных кристаллов описывается формулой

$$E_a = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + K'_3 \sin^6 \theta + K_3 \sin^6 \theta \cos^6 (\varphi - \psi), \quad (29.12)$$

где  $E_a$  — энергия анизотропии;  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K'_3$  и  $K_3$  — коэффициенты анизотропии;  $\theta$  и  $\varphi$  — полярные координаты. Для полей анизотропии

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 = 0; \quad H_0^A &= \frac{2K_1}{M_s}; \\ \theta = 90^\circ; \quad H_0^A &= -\frac{2(K_1 + 2K_2)}{M_s}; \\ \sin \theta_0 &= \sqrt{\frac{K_1}{2K_2}}; \quad H_0^A = 2 \left( \frac{K_1}{K_2} \right) \frac{K_1 + 2K_2}{M_s}. \end{aligned} \right\} \quad (29.13)$$

Здесь  $H_0^A$  — напряженность эффективного поля, необходимого для поворота вектора намагниченности в те направления, где меняется только  $\theta$ , а  $H_\varphi^A$  — поле, вращающее вектор намагниченности на поверхности конуса. Значение  $H_\varphi^A$  определяется формулой

$$H_\varphi^A = 36 |K_3| \frac{\sin^4 \theta_0}{M_s}. \quad (29.14)$$

Свойства гексагональных ферритов отражены в табл. 29.32 — 29.44 и на рис. 29.31 — 29.44.

В численных значениях табулированных параметров возможны некоторые неточности, связанные с неопределенностью состава и физического состояния образцов, на которых производились измерения. Различная термическая обработка также может изменить такие параметры, как распределение катионов между узлами, пористость и т. д. Поэтому во всех случаях, когда необходима более подробная информация, следует обращаться к оригинальной литературе.

Таблица 29.32. Некоторые характеристики ферромагнитных оксидов с гексагональной структурой

| Оксид                                                               | Символ           | Число слоев<br>в элементарной<br>ячейке | Пространственная<br>группа | Параметр<br>с, нм | Рентгеновская<br>плотность<br>$d_X, 10^3 \text{ кг/м}^3$ | Молекулярная<br>масса $M$ ,<br>а. е. м. | Литература |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------|
| BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>                                  | M                | (10)                                    | $P6_3/mmc$                 | 2,32              | 5,28                                                     | 1112                                    | [164]      |
| Ba <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> O <sub>8</sub>                      | S                | —                                       | —                          | —                 | 5,24                                                     | 232                                     | [166]      |
| BaFe <sub>2</sub> Fe <sub>16</sub> O <sub>27</sub>                  | W                | (14) <sub>1</sub>                       | $P6_3/mmc$                 | 3,2845            | 5,31                                                     | 1575                                    | [165]      |
| Ba <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> Fe <sub>28</sub> O <sub>46</sub>    | X                | (12) <sub>3</sub>                       | $R\bar{3}m$                | 8,411             | 5,29                                                     | 2686                                    | [165]      |
| Ba <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> Fe <sub>12</sub> O <sub>22</sub>    | Y                | (6) <sub>3</sub>                        | $R\bar{3}m$                | 4,3588            | 5,39                                                     | 1408                                    | [165]      |
| Ba <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> Fe <sub>24</sub> O <sub>41</sub>    | Z                | (22) <sub>1</sub>                       | $P6_3/mmc$                 | 5,23              | 5,33                                                     | 2520                                    | [165]      |
| Ba <sub>3</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>40</sub> O <sub>65</sub>    | —                | (17) <sub>2</sub>                       | $P6_3/mmc$                 | 7,936             | —                                                        | —                                       | [167, 168] |
| Ba <sub>4</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>36</sub> O <sub>60</sub>    | M <sub>2</sub> Y | (16) <sub>3</sub>                       | $R\bar{3}m$                | 3,81              | 5,31                                                     | 3622                                    | [167]      |
| Ba <sub>4</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>52</sub> O <sub>84</sub>    | —                | (22) <sub>3</sub>                       | $R\bar{3}m$                | 15,385            | —                                                        | —                                       | [167, 168] |
| Ba <sub>5</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>64</sub> O <sub>103</sub>   | —                | (27) <sub>2</sub>                       | $P6_3/mmc$                 | 12,576            | —                                                        | —                                       | [167, 168] |
| Ba <sub>6</sub> Zn <sub>6</sub> Fe <sub>60</sub> O <sub>104</sub>   | —                | (28) <sub>3</sub>                       | $R\bar{3}m$                | 20,04             | —                                                        | —                                       | [167]      |
| Ba <sub>10</sub> Zn <sub>8</sub> Fe <sub>72</sub> O <sub>126</sub>  | —                | (34) <sub>3</sub>                       | $R\bar{3}m$                | 24,398            | —                                                        | —                                       | [167]      |
| Ba <sub>12</sub> Zn <sub>10</sub> Fe <sub>84</sub> O <sub>148</sub> | —                | (40) <sub>1</sub>                       | $R\bar{3}m$                | 9,584             | —                                                        | —                                       | [167]      |
| Ba <sub>14</sub> Zn <sub>12</sub> Fe <sub>96</sub> O <sub>170</sub> | —                | (46) <sub>3</sub>                       | $R\bar{3}m$                | 33,109            | —                                                        | —                                       | [167]      |

Таблица 29.33. Состав и структура гексагональных ферритов типа Me<sub>2</sub>Y<sub>n</sub>, где Me—Mn, Zn [169]

| Состав                                                                     | Последовательность<br>блоков         | Количество<br>анионных<br>слоев | Простран-<br>ственная<br>группа | Параметр с, нм |        |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|--------|
|                                                                            |                                      |                                 |                                 | Эксперимент    | Расчет |
| Ba <sub>20</sub> (Mn, Zn) <sub>18</sub> Fe <sub>132</sub> O <sub>236</sub> | M(Y) <sub>4</sub> M(Y) <sub>5</sub>  | (64) <sub>3</sub>               | $R\bar{3}m$                     | 46,2           | 46,2   |
| Ba <sub>22</sub> (Mn, Zn) <sub>20</sub> Fe <sub>144</sub> O <sub>258</sub> | M(Y) <sub>5</sub> M(Y) <sub>5</sub>  | (70) <sub>1</sub>               | $P6_3/mmc$                      | 16,86          | 16,85  |
| Ba <sub>24</sub> (Mn, Zn) <sub>22</sub> Fe <sub>156</sub> O <sub>280</sub> | M...M(Y) <sub>11</sub>               | (76) <sub>3</sub>               | $R\bar{3}m$                     | 54,93          | 54,92  |
| Ba <sub>24</sub> (Mn, Zn) <sub>22</sub> Fe <sub>156</sub> O <sub>280</sub> | M(Y) <sub>1</sub> M(Y) <sub>10</sub> | (76) <sub>1</sub>               | $P\bar{3}m1$                    | 18,31          | 18,31  |
| Ba <sub>24</sub> (Mn, Zn) <sub>22</sub> Fe <sub>156</sub> O <sub>280</sub> | M(Y) <sub>4</sub> M(Y) <sub>7</sub>  | (76) <sub>1</sub>               | $P\bar{3}m1$                    | 18,31          | 18,31  |
| Ba <sub>24</sub> (Mn, Zn) <sub>22</sub> Fe <sub>156</sub> O <sub>280</sub> | M(Y) <sub>5</sub> M(Y) <sub>6</sub>  | (76) <sub>3</sub>               | $R\bar{3}m$                     | 54,93          | 54,92  |
| Ba <sub>26</sub> (Mn, Zn) <sub>26</sub> Fe <sub>180</sub> O <sub>324</sub> | M(Y) <sub>6</sub> M(Y) <sub>7</sub>  | (88) <sub>3</sub>               | $R\bar{3}m$                     | 63,67          | 63,64  |

Таблица 29.34. Рентгеновская плотность  $d_X$  и молекулярная масса  $M$  некоторых оксидов с гексагональной кристаллической структурой [5]

| Металл | W—BaMe <sub>2</sub> Fe <sub>16</sub> O <sub>27</sub> |                       | Y—Ba <sub>6</sub> Me <sub>2</sub> Fe <sub>12</sub> O <sub>22</sub> |                       | Z—Ba <sub>3</sub> Me <sub>2</sub> Fe <sub>24</sub> O <sub>41</sub> |                       |
|--------|------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|        | $d_X, 10^3 \text{ кг/м}^3$                           | $M, \text{ а. е. м.}$ | $d_X, 10^3 \text{ кг/м}^3$                                         | $M, \text{ а. е. м.}$ | $d_X, 10^3 \text{ кг/м}^3$                                         | $M, \text{ а. е. м.}$ |
| Mg     | 5,10                                                 | 1512                  | 5,14                                                               | 1346                  | 5,20                                                               | 2457                  |
| Mn     | 5,31                                                 | 1573                  | 5,38                                                               | 1406                  | 5,33                                                               | 2518                  |
| Fe     | 5,31                                                 | 1575                  | 5,39                                                               | 1408                  | 5,33                                                               | 2520                  |
| Co     | 5,31                                                 | 1577                  | 5,40                                                               | 1410                  | 5,35                                                               | 2522                  |
| Ni     | 5,32                                                 | 1580                  | 5,40                                                               | 1414                  | 5,35                                                               | 2526                  |
| Cu     | 5,36                                                 | 1590                  | 5,45                                                               | 1424                  | 5,37                                                               | 2536                  |
| Zn     | 5,37                                                 | 1594                  | 5,46                                                               | 1428                  | 5,37                                                               | 2539                  |

Таблица 29.35. Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа Me<sub>2</sub>W [5]

| Металл                                         | $T_C, \text{ К}$ | $\sigma_c, 10^{-8} \text{ кА} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ |       | $M_{S'}, \text{ кА/м}$ | $n_B, \mu_B (T = 0 \text{ К})$ |        |
|------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------|-------|------------------------|--------------------------------|--------|
|                                                |                  | 0 К                                                       | 293 К | 0 К                    | Эксперимент                    | Расчет |
|                                                |                  |                                                           |       |                        |                                |        |
| $\text{Mn}_2$                                  | 690              | 97                                                        | 59    | 310                    | 27,4                           | 29,2   |
| $\text{Fe}_2^{2+}$                             | 730              | 98                                                        | 78    | 416                    | 27,4                           | 28     |
| $\text{NiFe}^{2+}$                             | 790              | 79                                                        | 52    | 275                    | 22,3                           | 26,4   |
| $\text{ZnFe}^{2+}$                             | 700              | 108                                                       | 73    | 382                    | 30,7                           | 31,6   |
| $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}^{2+}$ | 720              | 104                                                       | 68    | 362                    | 29,5                           | 29,2   |

Таблица 29.36. Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа  $Me_2Y$  [5]

| Металл | $T_C$ , К | $\sigma_s^*$ , м <sup>2</sup> /кг |       | $M_s^*$ ,<br>кА/м | $n_B$ , $\mu_B$ ( $T = 0$ К) |        |
|--------|-----------|-----------------------------------|-------|-------------------|------------------------------|--------|
|        |           | 0 К                               | 293 К | 0 К               | Экспери-<br>мент             | Расчет |
| Mg     | 550       | 20                                | 23    | 120               | 6,9                          | 2,2    |
| Mn     | 560       | 42                                | 31    | 167               | 10,6                         | 9,2    |
| Co     | 610       | 39                                | 34    | 183               | 9,8                          | 7,4    |
| Ni     | 660       | 25                                | 24    | 127               | 6,3                          | 4,6    |
| Cu     | —         | 28                                | —     | —                 | 7,1                          | 2,6    |
| Zn     | 400       | 72                                | 42    | 227               | 18,4                         | 20,0   |

Таблица 29.37. Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа  $Me_2Z$  [5]

| Металл | $T_C$ , К | $\frac{\sigma_s^*}{10^{-3} \text{ кА} \cdot \text{м}^2/\text{кг}}$ |       | $\frac{M_s^*}{\text{кА/м}}$ | $n_B \cdot \mu_B \text{ (} T = 0 \text{ К)}$ |        |
|--------|-----------|--------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------|----------------------------------------------|--------|
|        |           | 0 К                                                                | 293 К | 0 К                         | Эксперимент                                  | Расчет |
| Mg     | —         | 55                                                                 | —     | —                           | 24                                           | 26,9   |
| Co     | 680       | 69                                                                 | 50    | 267                         | 31,2                                         | 29,8   |
| Ni     | —         | 54                                                                 | —     | —                           | 24,6                                         | 26,1   |
| Cu     | 710       | 60                                                                 | 46    | 247                         | 27,2                                         | 27,1   |
| Zn     | 630       | —                                                                  | 58    | 310                         | —                                            | —      |

Таблица 29.38. Магнитные свойства ферритов типа  $SrO \cdot nFe_2O_3$  и  $PbO \cdot nFe_2O_3$  [170—172]

| Соединение                                 | $M_s^*$ , кА/м | $M_r^*$ , кА/м | $H_c^*$ , кА/м |
|--------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| $SrFe_8O_{13}$ ( $SrO \cdot 4Fe_2O_3$ )    | 259            | 179            | 239            |
| $SrFe_{12}O_{19}$ ( $SrO \cdot 6Fe_2O_3$ ) | 247            | 183            | 229            |
| $SrFe_{18}O_{28}$ ( $SrO \cdot 9Fe_2O_3$ ) | 151            | 120            | 267            |
| $PbFe_8O_{13}$ ( $PbO \cdot 4Fe_2O_3$ )    | 279            | 159            | 119            |
| $PbFe_{12}O_{19}$ ( $PbO \cdot 6Fe_2O_3$ ) | 199            | 143            | 231            |
| $PbFe_{18}O_{28}$ ( $PbO \cdot 9Fe_2O_3$ ) | 135            | 80             | 191            |

Таблица 29.39. Константа анизотропии  $K_3$ , намагниченность насыщения и поле анизотропии  $H_\phi^A$  для некоторых гексагональных ферримангнитных оксидов [5]

| Соединение                                 | $T$ , К | $M_s^*$ , кА/м | $K_3$ , Дж/м <sup>3</sup> | $H_\phi^A$ , А/м |
|--------------------------------------------|---------|----------------|---------------------------|------------------|
| $Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$                    | 77      | 210            | 200                       | 27 100           |
|                                            | 293     | 187            | 80                        | 12 300           |
|                                            | 443     | 145            | 15                        | 2940             |
| $Ba_3Co_{1,5}Fe_{0,5}^{2+}Fe_{24}O_{41}$   | 293     | 280            | 5,5                       | 558              |
|                                            | 431     | 220            | 0,9                       | 160              |
| $Ba_3Co_{1,92}Fe_{0,08}^{2+}Fe_{24}O_{41}$ | 293     | 280            | 12,0                      | 1270             |
| $Ba_2CoZn_{0,5}Fe_{0,5}^{2+}Fe_{24}O_{41}$ | 293     | 290            | 2,5                       | 239              |
| $Ba_2Zn_{1,5}Fe_{0,5}^{2+}Fe_{12}O_{22}$   | 293     | 190            | 0,6                       | 80               |

Таблица 29.40. Значения констант анизотропии  $K_1$  или  $K_1 + 2K_2$ , намагниченности насыщения  $M_s$  и напряженности поля анизотропии  $H_\theta^A$  некоторых гексагональных оксидов при температуре 293 К [5]

| Оксид                                 | Символ                        | $K_1$ , $10^5$ Дж/м <sup>3</sup> | $K_1 + 2K_2$ , $10^5$ Дж/м <sup>3</sup> | $M_s$ , кА/м | $H_\theta^A$ , кА/м |
|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|--------------|---------------------|
| $BaFe_{12}O_{19}^{*1}$                | M                             | +3,3                             | —                                       | 380          | 1350                |
| $BaFe_{18}O_{27}^{*1}$                | $Fe_2W_2$                     | +3,0                             | —                                       | 314          | 1510                |
| $BaZnFe_{17}O_{27}$                   | $FeZnW$                       | +2,4                             | —                                       | 380          | 1000                |
| $BaZn_{1,5}Fe_{16,5}O_{27}$           | $Fe_{0,5}Zn_{1,5}W$           | +2,1                             | —                                       | 380          | 885                 |
| $BaMnZnFe_{16}O_{27}$                 | $MnZnW$                       | +1,9                             | —                                       | 370          | 811                 |
| $BaNi_2Fe_{16}O_{27}$                 | $Ni_2W$                       | +2,1                             | —                                       | 330          | 1010                |
| $BaNi_{0,5}ZnFe_{16,5}O_{27}$         | $ZnFe_{0,5}Ni_{0,5}W$         | +1,6                             | —                                       | 350          | 725                 |
| $BaCo_{0,75}Zn_{0,75}Fe_{16,5}O_{27}$ | $Fe_{0,5}Co_{0,75}Zn_{0,75}W$ | —                                | —0,4                                    | 360          | 175                 |
| $Ba_2Mg_2Fe_{12}O_{22}$               | $Mg_2Y$                       | —                                | —0,6                                    | 119          | 800                 |
| $Ba_2Ni_2Fe_{12}O_{22}$               | $Ni_2Y$                       | —                                | —0,9                                    | 127          | 1110                |
| $Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{22}$               | $Zn_2Y$                       | —                                | —1,0                                    | 227          | 715                 |
| $Ba_2Zn_{1,5}Fe_{12,5}O_{22}^{*1}$    | $Fe_{0,5}Zn_{1,5}Y$           | —                                | —0,9                                    | 191          | 756                 |
| $Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}^{*1}$          | $Co_2Y$                       | —                                | —2,6                                    | 185          | 2230                |
| $Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}^{*1}$          | $Co_2Z$                       | —                                | —1,8                                    | 270          | 1030                |

\*1 Измерения проводились на монокристаллах.

Таблица 29.41. Магнитные свойства монокристаллов гексаферритов  $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Ir}_x^{4+}\text{Zn}_x^{2+}\text{O}_{19}$  с большой анизотропией в базисной плоскости [173]

| x    | $H_a$ , кА/м<br>( $T = 300$ К) |                              | $\Delta H$ , кА/м<br>( $T = 300$ К) | $T_C$ , К | $\rho_s$ , $\frac{\text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}}$<br>( $T = 300$ К) |
|------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------|
|      | Из измерений намагниченности   | Из ферромагнитного резонанса |                                     |           |                                                                            |
| 0    | 1350                           | 1350                         | 4,2 при 55 ГГц                      | 720       | 65                                                                         |
| 0,16 | 765                            | —                            | —                                   | 635       | —                                                                          |
| 0,52 | 1200                           | 1270                         | 83,5 при 17 ГГц                     | 560       | 65                                                                         |
| 0,56 | 1270                           | —                            | —                                   | 550       | 60                                                                         |
| 0,60 | 1600                           | 1750                         | 93,5 при 14 ГГц                     | 520       | 47                                                                         |

Таблица 29.42. Ширина линии ферромагнитного резонанса для монокристаллов  $\text{Me}_2\text{Y}$  [174]

| Монокристалл                                                                         | Параметр c, нм | $\Delta H$ , А/м<br>( $T = 300$ К)    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------|
| $\text{Ba}_2\text{Zn}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$                                  | 4,36           | 638 (9000 МГц)                        |
| $\text{Ba}_2(\text{Zn}, \text{Mn})\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$<br>(3,5% Мп по массе) | 4,3564         | 303 (9000 МГц)<br>390<br>(17 300 МГц) |

Таблица 29.43. Свойства некоторых гексагональных ферритов, используемых в волноводах в миллиметровом диапазоне длин волн [175]

| Состав | $T_{\text{обж}}$ , К | $\rho_s$ , $10^8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | Степень ориентации | $\text{tg } \delta$<br>( $f = 9,5$ ГГц) | $\frac{\epsilon'}{\epsilon''}$<br>( $f = 9,5$ ГГц) | $M_s$ , $\frac{\text{кА}}{\text{м}}$ | $H_a$ , $\frac{\text{кА}}{\text{м}}$ | $T_C$ , К | $f_{\text{рез}}$ , ГГц |
|--------|----------------------|------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------------------|
|--------|----------------------|------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------------------|

Система  $\text{BaO} \cdot 2\text{NiO} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (8-x)\text{Fe}_2\text{O}_3$ , обозначаемая  $\text{NiW}(x\text{Al})$

|                                |      |      |      |       |      |     |      |     |      |
|--------------------------------|------|------|------|-------|------|-----|------|-----|------|
| $\text{Ni}_2\text{W}$ (0,40Al) | 1573 | 4,58 | 0,69 | —     | —    | —   | 1210 | 750 | 49,0 |
| $\text{Ni}_2\text{W}$ (0,60Al) | 1623 | 4,58 | 0,88 | 0,001 | 15,4 | 214 | 1360 | 730 | 52,0 |
| $\text{Ni}_2\text{W}$ (0,73Al) | 1623 | 4,60 | 0,83 | 0,003 | 14,9 | 195 | 1430 | 720 | 55,0 |
| $\text{Ni}_2\text{W}$ (0,86Al) | 1623 | 4,63 | 0,84 | 0,004 | 15,1 | 181 | 1510 | 710 | 58,0 |
| $\text{Ni}_2\text{W}$ (1,00Al) | 1623 | 4,55 | 0,86 | 0,002 | 14,5 | 166 | 1570 | 690 | 62,0 |

Система  $\text{SrO} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (6-x)\text{Fe}_2\text{O}_3$ , обозначаемая  $\text{SrM}(x\text{Al})$

|                       |      |      |      |       |      |     |      |     |      |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|-----|------|-----|------|
| $\text{SrM}$ (0,00Al) | 1623 | 4,91 | 0,79 | —     | —    | 334 | 1510 | 750 | 60,0 |
| $\text{SrM}$ (0,20Al) | 1573 | 4,48 | 0,87 | 0,001 | 18,6 | 263 | 1600 | 730 | 64,0 |
| $\text{SrM}$ (0,53Al) | 1573 | 4,11 | 0,89 | 0,001 | 16,2 | 168 | 2010 | 690 | 74,0 |
| $\text{SrM}$ (0,80Al) | 1573 | 4,00 | 0,91 | —     | —    | —   | 2470 | 650 | 86,0 |
| $\text{SrM}$ (0,95Al) | 1573 | 3,95 | 0,88 | —     | —    | —   | 2780 | 630 | 93,0 |

Таблица 29.44. Поле анизотропии  $H_a$  и  $\text{tg } \delta$  некоторых гексаферритов типа М, используемых в миллиметровом диапазоне длин волн [176]

| Гексаферрит                                                                     | $H_a$ , кА/м | $\text{tg } \delta$<br>(9 ГГц) | $f_{\text{рез}}$ , ГГц |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------|
| $\text{BaZn}_{0,3}\text{Ti}_{0,3}\text{Fe}_{11,4}\text{O}_{19}$                 | 1090         | 0,002                          | 45                     |
| $\text{BaAl}_{0,3}\text{Fe}_{11,7}\text{O}_{19}$                                | 1390         | 0,002                          | 55                     |
| $\text{SrNi}_{0,3}\text{Ge}_{0,3}\text{Al}_{1,86}\text{Fe}_{9,54}\text{O}_{19}$ | 2170         | 0,006                          | 82                     |
| $\text{SrNi}_{0,1}\text{Ge}_{0,3}\text{Al}_{2,5}\text{Fe}_{9,1}\text{O}_{19}$   | 2595         | 0,008                          | 96                     |

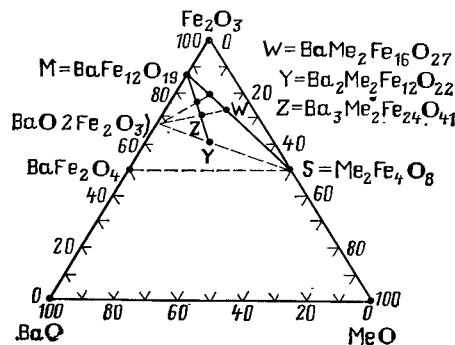


Рис. 29.31. Диаграмма составов ферритов с гексагональной структурой. Символ Me обозначает двухвалентный ион (или комбинацию двухвалентных ионов) [166]



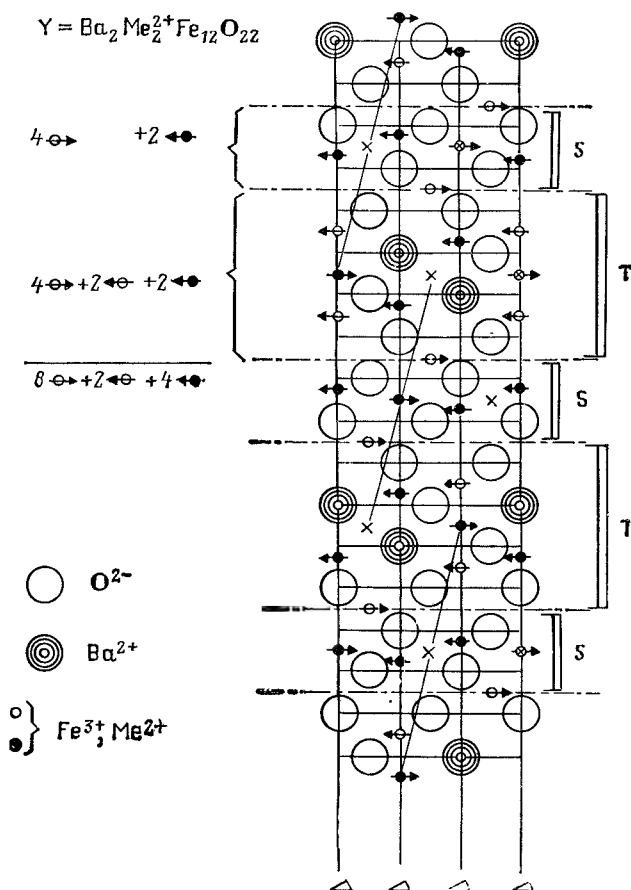
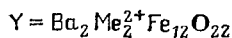
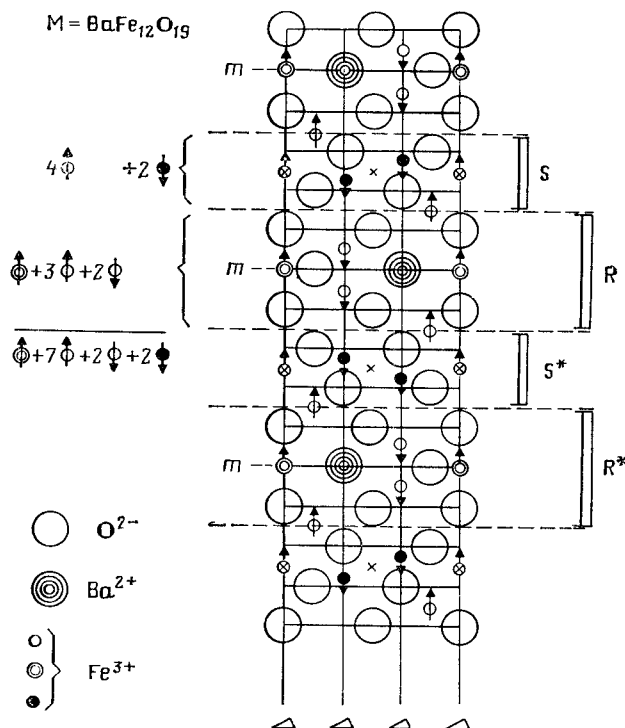
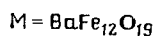


Рис. 29.32. Сечение структуры магнетоплюмбита  $M$  с осью  $c$ , направленной вертикально [5]:

стрелки — направление спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; через слои, содержащие ионы бария, проходит зеркальные плоскости, обозначенные буквой  $m$ ; изображенная структура состоит из шпинельных блоков  $S$ , разделенных блоками, содержащими ионы бария; звездочки — поворот данного блока вокруг оси  $c$  на  $180^\circ$

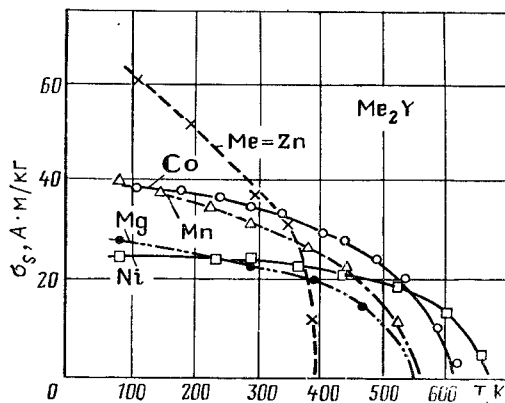


Рис. 29.34. Зависимость намагниченности насыщения  $\sigma_s$  соединений со структурой типа  $Y$  от температуры [5]. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженностью 875 кА/м (11 кЭ)

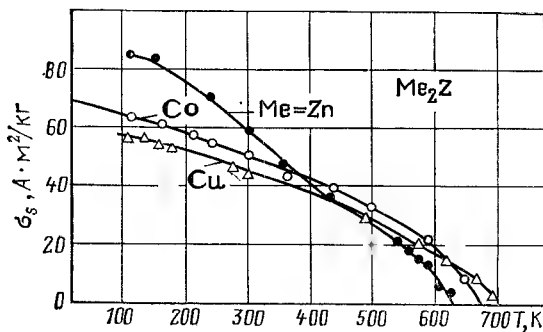


Рис. 29.35. Зависимость намагниченности насыщения  $\sigma_s$  соединений со структурой типа  $Z$  от температуры. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженностью 875 кА/м для  $Co_2Z$  и  $Zn_2Z$  и 1430 кА/м — для  $Cu_2Z$  [5]

Рис. 29.33. Сечение структуры типа  $Y$  с осью  $c$ , направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов, которые в данном случае ориентированы перпендикулярно осям  $c$ ; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; изображенная структура состоит из последовательно расположенных блоков  $S$  и  $T$

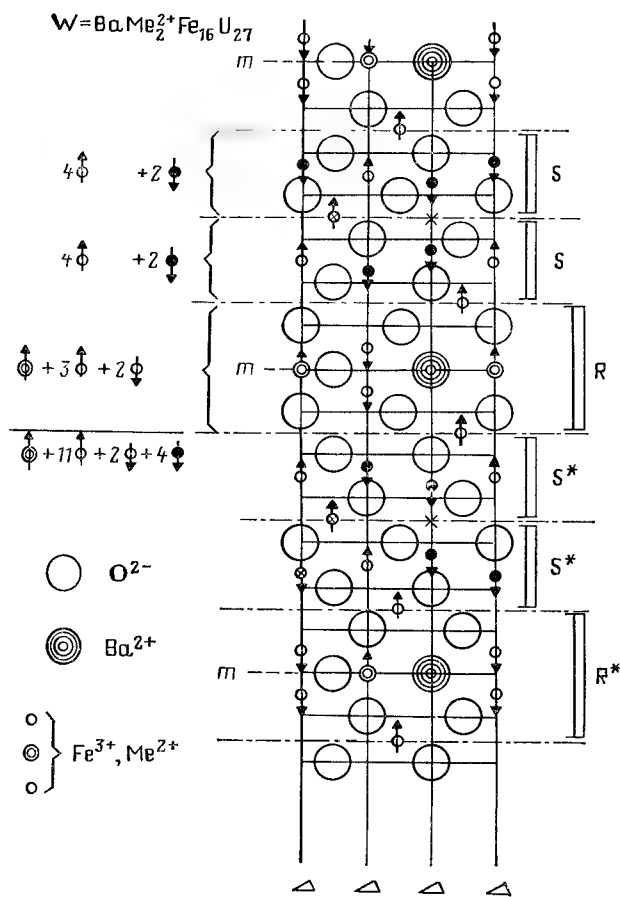


Рис. 29.36. Сечение структуры типа W с осью  $c$ , направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; звездочки — поворот данного блока вокруг оси  $c$  на  $180^\circ$ ; структуру можно рассматривать как сумму структур типа M и S

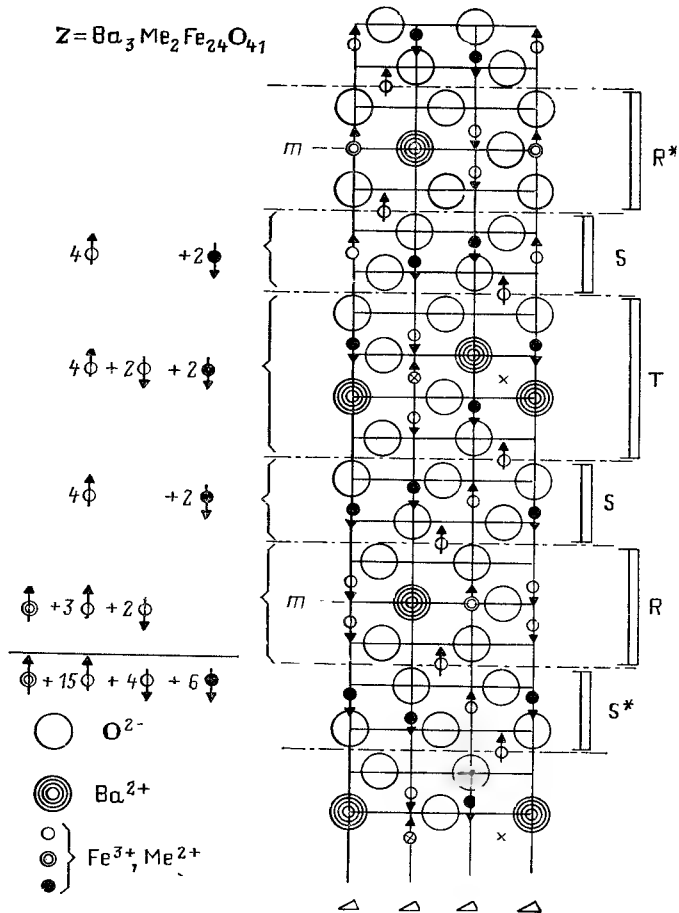


Рис. 29.37. Сечение структуры типа Z с осью  $c$ , направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центра симметрии; звездочки — поворот данного блока вокруг оси  $c$  на  $180^\circ$ ; структуру можно рассматривать как сумму структур типа M и Y

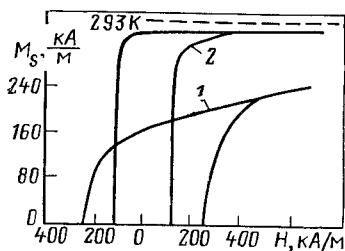
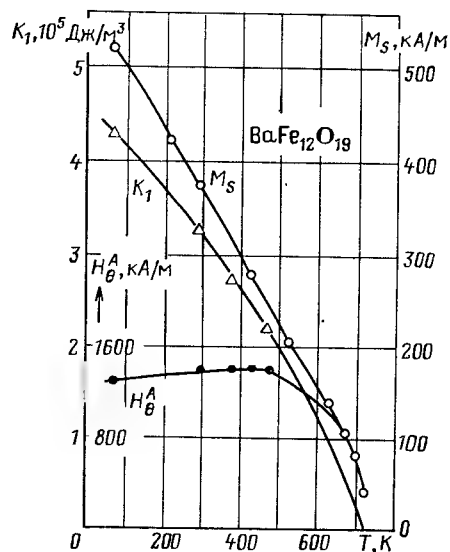


Рис. 29.38. Гистерезисные петли для образца  $BaFe_{12}O_{19}$  [5]:

1 — изотропный образец; 2 — кристаллографически текстурированный образец

Рис. 29.39. Зависимость намагниченности насыщения  $M_s$ , константы анизотропии  $K_1$  и поля анизотропии  $H_0^A$  для  $BaFe_{12}O_{19}$  от температуры



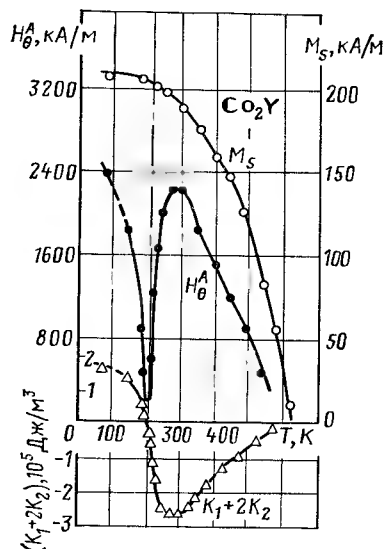


Рис. 29.40. Зависимость намагниченности  $M_s$ , констант анизотропии  $(K_1+2K_2)$  и поля анизотропии  $H_0^A$  для  $\text{Co}_2\text{Y}$  от температуры [5]

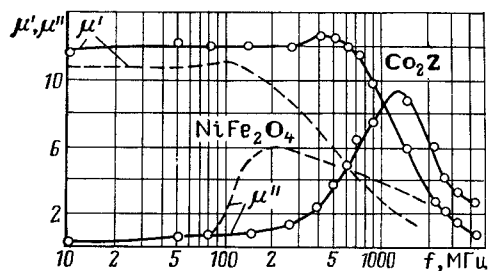


Рис. 29.41. Магнитные спектры поликристаллического образца  $\text{Co}_2\text{Z}$  и шпинели  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , которая имеет примерно такую же магнитную проницаемость на низких частотах [5]

## 29.5. НЕКОТОРЫЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 29.45. Магнитные свойства соединений трехвалентного хрома с галогенами [177]

$\theta_p$  — парамагнитная точка Кюри;  $2K_1/M_s$  — напряженность поля анизотропии;  $\mu_{\text{эф}}$  — эффективный магнитный момент

| Соединение      | Структура                                                                               | $10^3 \rho_x, \text{кг/м}^3$ | $T_C, \text{K}$ | $\theta_p, \text{K}$ | $n_B, \mu_B$ | $M_s, \text{кА/м}$ | $\frac{2K_1}{M_s}, \frac{\text{кА}}{\text{м}}$<br>( $T=1,5 \text{ K}$ ) | $K_1, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$<br>( $T=1,5 \text{ K}$ ) | $\mu_{\text{эф}}, \mu_B$ |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------------|--------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|
| $\text{CrF}_3$  | $D_{3d}^6 - \bar{R}\bar{3}c$ ;<br>$a = 0,52643 \text{ нм}$ ;<br>$\alpha = 56,563^\circ$ | —                            | 69,8            | -124                 | —            | —                  | —                                                                       | —                                                            | 3,85                     |
| $\text{CrCl}_3$ | $D_3^3 - P_312$ ; $D_3^5 - P_212$ ;<br>$a = 0,6 \text{ нм}$ ; $c = 1,73 \text{ нм}$     | 2,95                         | 16,8            | +31                  | —            | 308                | —                                                                       | —                                                            | 3,69                     |
| $\text{CrBr}_3$ | $C_{3i}^2 - \bar{R}\bar{3}$ ;<br>$a = 0,626 \text{ нм}$ ; $c = 1,82 \text{ нм}$         | 4,75                         | 35,7            | +47                  | 3,0          | 259                | 546                                                                     | $9,4 \cdot 10^4$                                             | 3,85                     |
| $\text{CrI}_3$  | $D_3^3 - P_312$                                                                         | 5,36                         | 68              | +70                  | 3,1          | 214                | 2260                                                                    | $3,1 \cdot 10^5$                                             | 4,03                     |

Таблица 29.46. Магнитные свойства  $\text{CoMnO}_3$ ,  $\text{NiMnO}_3$ ,  $\text{BiMnO}_3$  и  $\text{BiCrO}_3$

| Соединение       | Структура                   | Параметры ячейки<br>( $T = 300 \text{ K}$ )                                                                                | $T_C, \text{K}$ | $n_B, \mu_B$                       | $\mu_{\text{эф}}, \mu_B$ | Литература |
|------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------|------------|
| $\text{CoMnO}_3$ | $C_{3i}^2 - \bar{R}\bar{3}$ | $a = 0,5385 \text{ нм}$ ;<br>$\alpha = 54^\circ 31'$                                                                       | 120             | 0,72 (0 K)                         | —                        | [180—182]  |
| $\text{NiMnO}_3$ | $C_{3i}^2 - \bar{R}\bar{3}$ | $a = 0,5343 \text{ нм}$ ;<br>$\alpha = 54^\circ 39'$                                                                       | 120—160         | 0,76 (0 K)                         | —                        | [180—182]  |
| $\text{BiMnO}_3$ | Перовскит                   | $a = c = 0,3935 \text{ нм}$ ;<br>$b = 0,3989 \text{ нм}$ ;<br>$\alpha = \gamma = 91^\circ 28'$ ;<br>$\beta = 90^\circ 58'$ | 103             | 2 (77 K)<br>4 (экстраполя-<br>ция) | 5                        | [178, 179] |
| $\text{BiCrO}_3$ | »                           | $a = c = 0,3906 \text{ нм}$ ;<br>$b = 0,387 \text{ нм}$ ;<br>$\alpha = \gamma = 90^\circ 33'$ ;<br>$\beta = 89^\circ 9'$   | 123             | —                                  | —                        | [178, 179] |

Таблица 29.47. Кристаллографические и магнитные свойства ферримагнитных фторидов с ионами  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Co}^{3+}$  [183]

| Соединение                            | Параметры ячейки                                                      |                                                                                                                          | $T_C$ , К        | $n_B$ , $\mu_B$<br>(0 К) | $M_S$ , кА/м<br>(0 К) |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|
|                                       | в высокотемпературной фазе                                            | в низкотемпературной фазе                                                                                                |                  |                          |                       |
| $\text{Na}_5\text{Fe}_3\text{F}_{14}$ | $a = 0,734$ нм;<br>$c = 1,038$ нм;<br>$\rho = 3260$ кг/м <sup>3</sup> | $a = 7,323$ нм;<br>$b = 0,746$ нм;<br>$c = 1,272$ нм;<br>$\beta = 90 \pm 0,5^\circ$ ;<br>$\rho = 3150$ кг/м <sup>3</sup> | 80               | 5                        | 199                   |
| $\text{Na}_5\text{Cr}_3\text{F}_{14}$ | —                                                                     | —                                                                                                                        | < 20             | —                        | —                     |
| $\text{Na}_5\text{Co}_3\text{F}_{14}$ | —                                                                     | —                                                                                                                        | $77 < T_C < 200$ | —                        | —                     |

Таблица 29.48. Магнитные свойства соединений двухвалентного европия

| Соединение                         | Структура                     | Параметры ячейки, нм                                                  | $T_C$ , К | $\theta_p$ , К | $n_B \cdot \mu_B$<br>( $T = 0$ К) | Литература |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|-----------------------------------|------------|
| $\text{EuF}_2$                     | Кубическая                    | 0,585                                                                 | 2         | -5             | —                                 | [184]      |
| $\text{EuCl}_2$                    | Ромбическая                   | $a = 0,448$<br>$b = 0,748$ ;<br>$c = 0,896$                           | —         | 0              | —                                 | [184]      |
| $\text{EuBr}_2$                    | Ромбическая                   | $a = 0,43$ ;<br>$b = 0,92$ ;<br>$c = 1,142$                           | —         | 0              | —                                 | [184]      |
| $\text{EuI}_2$                     | Моноклиная                    | $a = 0,762$ ;<br>$b = 0,823$ ;<br>$c = 0,788$ ;<br>$\beta = 98^\circ$ | 5         | +5             | 7                                 | [184]      |
| $\text{EuO}$                       | NaCl                          | 0,514                                                                 | 73        | +76            | 6,8                               | [184]      |
| $\text{EuS}$                       | —                             | 0,595                                                                 | 16,5      | +19            | 6,87                              |            |
| $\text{EuSe}$                      | —                             | 0,619                                                                 | 7         | +9             | 6,7                               |            |
| $\text{EuTe}$                      | —                             | 0,66                                                                  | 9,5       | -6             | 6,9                               |            |
| $\text{Eu}_2\text{P}_2\text{O}_7$  | Тетраэдрическая               | —                                                                     | —         | -3             | —                                 | [185]      |
| $\text{Eu}_3(\text{PO}_4)_2$       | Ромбоэдрическая               | —                                                                     | —         | +5             | 6,7                               | [185]      |
| $\text{Eu}_2\text{SiO}_4$          | Ромбическая<br>(порошок)      | $a = 0,971$ ;<br>$b = 4,956$ ;<br>$c = 0,595$                         | 7         | +7             | 6,0                               | [184]      |
| $\text{Eu}_2\text{SiO}_4$          | Ромбическая<br>(монокристалл) | $a = 0,971$ ;<br>$b = 4,956$ ;<br>$c = 0,565$                         | —         | +10            | 6,5                               | [184]      |
| $\text{Eu}_3\text{SiO}_5$          | Тетраэдрическая               | —                                                                     | 4         | +19            | 6,7                               | [184]      |
| $\text{EuAl}_2\text{O}_4$          | —                             | —                                                                     | —         | 0              | —                                 | [185]      |
| $\text{Eu}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ | Псевдокубическая              | —                                                                     | —         | 10             | 6,2                               |            |
| $\text{Eu}_5\text{Al}_2\text{O}_8$ | —                             | —                                                                     | —         | 6              | 5,8                               |            |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неель Л. Антиферромагнетизм: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
2. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
3. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
4. Wangsness R. K. // Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 68—71.

5. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
6. Shull C. G., Wollen E. O., Kohler W. C. — Phys. Rev. 1951. Vol. 84. P. 912—921.
7. Bickford L. R., Brownlow J. M., Penoyer R. F. // Proc. Instn. Electr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P. 238.
8. Bickford L. R., Pappis J., Stull J. L. // Phys. Rev. 1955. Vol. 99. P. 1210—1217.

9. Bickford L. R.//Ibid. 1950. Vol. 78. P. 449—457.
10. Calhoun B. A.//Ibid. 1954. Vol. 94. P. 1582—1585.
11. Nathans R. e. a.//Proc. Instn. Electr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. № 5. P. 217—219
12. Verwey J. W., Heilmann E. L.//J. Chem. Phys. 1947. Vol. 15. P. 174—180.
13. Gorter E. W.//Philips Res. Repts. 1954. Vol. 9 P. 295—296.
14. Galt J. K., Matthias E. T., Remeika J. P.//Phys. Rev. 1950. Vol. 79. P. 391—392.
15. Bozorth R. M., Tilden E. F., Williams A. J.//Ibid. 1955. Vol. 99. P. 1788—1798.
16. Dwight K., Menyuk N.//Bull. Amer. Phys. Soc. 1958. Vol. 3. Ser. 2. P. 41.
17. Smit J., Wijn H. P. J.//Advances in Electronics and Electr. Phys. 1954. Vol. 6. P. 83—84.
18. Vager W. A., Galt J. K., Merritt F. R.//Phys. Rev. 1955. Vol. 99. P. 1203—1210.
19. Генделев С. Ш., Лаповок Б. Л., Рубинштейн Б. Е.//Физика твердого тела. 1963. Т. 5. С. 3037—3038.
20. Sekizawa H., Sekizawa K.//J. Phys. Soc. Japan. 1962. Vol. 17. Suppl. B-1. P. 380—383.
21. Epstein D. J.//Conf. on Magn. and Magn. Mater., Boston, Amer. Inst. Electr. Engng. 1957. P. 498—499.
22. Van Uiterl L. G.//J. Chem. Phys. 1956. Vol. 24. P. 306—310.
23. Hastings J. M., Corliss L. M.//Phys. Rev. 1956. Vol. 104. P. 328—331.
24. Dillon J. F., Geschwind S., Jaccarino V.//Phys. Rev. 1955. Vol. 100. P. 750—752.
25. Гуревич А. Г., Гублер И. Е., Титова А. Г.//Физика твердого тела. 1961. Т. 3. С. 19—31.
26. Teale R. W.//J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, Suppl. № 3. P. 1295—1298.
27. Завета К., Свирина Е., Маликова О.//Физика твердого тела. 1962. Т. 4. С. 3593—3595.
28. Braun P. B.//Nature. 1952. Vol. 170. P. 1123.
29. Folen V. J.//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31, Suppl. P. 1665—1675.
30. Schnitzler A. D., Folen V. J., Rado G. T.//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31, Suppl. № 3. P. 348—352.
31. Enz U.//Erzeugung von Vetterschaft mit Ferriten Thesis. Zürich. 1955.
32. Comstock R. L., Remeika J. P.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 1018—1019
33. Nielsen J. W., Lepore D. A., Zneimer J., Townsend G. B.//J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, Suppl. № 3. P. 1379—1380.
34. Bertaut E.//Compt. rend. 1950. Vol. 230. P. 213—216.
35. Prince E., Trueting R. G.//Acta crystallogr. 1956. Vol. 9. P. 1025—1028.
36. Weil L., Bertaut F., Bochirol L.//J. Phys. rad. 1950. Vol. 11. P. 208—212.
37. Gorter E. W.//Nature. 1950. Vol. 165. P. 798—799.
38. Okamura T., Kojima Y.//Phys. Rev. 1952. Vol. 86. P. 1040—1041.
39. Weisz R. S.//Ibid. 1954. Vol. 96. P. 800—801.
40. Snoek J. L.//Philips Techn. Rev. 1946. Vol. 8. P. 353—355.
41. Okamura T., Torizuka Y.//Nature. 1951. Vol. 168. P. 872.
42. Okamura T., Fujimura T., Date M.//Phys. Rev. 1952. Vol. 85. P. 1041—1042
43. Рабкин Л. И. Высоочастотные ферромагнетики. М. — Л.: Физматгиз. 1960.
44. Bochirol L.//Compt. rend. 1951. Vol. 233. P. 736—738.
45. Prince E.//Phys. Rev. 1956. Vol. 102. P. 674—676.
46. Pauthenet R.//Compt. rend. 1950. Vol. 230. P. 1842—1845.
47. Guillaud C.//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25. P. 64—74.
48. Tannenwald P. E.//Phys. Rev. 1955. Vol. 90. P. 463—464.
49. Torizuka Y.//Sci. Repts. Inst. Tôhoku Univ. 1951. Vol. A3. P. 383—384.
50. Gorliss L. M., Hastings J. M., Brockman F. G.//Phys. Rev. 1953. Vol. 90. P. 1013—1018.
51. Bacon G. N., Roberts F. F.//Acta crystallogr. 1953. Vol. 6. P. 57—59.
52. Jones G. O., Roberts F. F.//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1952. Vol. 65B. P. 390—393.
53. Belson H. S., Kriessman C. J.//J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 170S—170S.
54. Rado G. T., Folen V. J., Emerson W. H.//Proc. Inst. Electron. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P. 198—199.
55. Yager W. A., Merrit F. R., Guillaud C.//Phys. Rev. 1951. Vol. 81. P. 477—478.
56. Торопов Н. А., Борисенко А. И.//Журнал прикл. химии. 1950. Т. 88. С. 1243.
57. Inoue T., Iida S.//J. Phys. Japan. 1958. Vol. 13. P. 656—657.
58. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма: Пер. с япон.//Под ред. Г. А. Смоленского и Р. В. Писарева. М.: Мир. 1983.
59. Arai K.-I., Tsuya N.//Ferrites: Proc. of the Intern. Conf. 1970. P. 51—54.
60. Hastings J. M., Corliss L. M.//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25. P. 114—121.
61. Ferromagnetic materials. A handbook on the properties of magnetically ordered substances/Ed. E. P. Wohlfarth. — North — Holland Publ. Comp. 1980. Vol. 2.
62. Guillaud C., Greveaux H.//Compt. rend 1950. Vol. 230. P. 1458—1461.
63. Guillaud C.//J. phys. et radium. 1951. Vol. 12. P. 239.
64. Okamura T., Kojima Y., Torizuka Y.//Sci. Repts. Inst. Tôhoku Univ. 1952. Vol. A4. P. 72.
65. Okamura T.//Phys. Rev. 1952. Vol. 85. P. 690.
66. Gorter E. W.//Philips Res. Repts. 1954. Vol. 9. P. 295.
67. McGuire T. R.//Phys. Rev. 1953. Vol. 91. P. 206.
68. Carter A. E., Miles D. A., Welch A. J. A.//Proc. Inst. Electr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P. 141
69. Gorter E. W.//Philips Res. Repts. 1954. Vol. 9. P. 403.
70. Maria Neto J. e. a.//J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55, № 6, pt. II B. P. 2338—2339
71. Смоленский Г. А.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1952. Т. 16. С. 728—740.
72. Enz U.//Physica. 1958. Vol. 24. P. 609
73. Метфессель Э., Маттис Д. Магнитные полупроводники: Пер. с англ. М.: Мир, 1972.
74. Магнитные полупроводники — халькогенидные шпинели/К. П. Белов и др. М.: Изд. МГУ, 1981.
75. Нараев Э. Л. Физика магнитных полупроводников. М.: Наука, 1979.
76. Menyuk N., Dwight K., Arnott R. J.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. № 3. P. 1387—1389.
77. Остин Н., Илуэл Д. Магнитные полупроводники//Успехи физ. наук. 1972. Т. 106. С. 337—364.
78. Wojtowicz P. J.//IEEE Trans. Magn. 1969. Vol. 5. P. 840.
79. Белов К. П., Королева Л. И., Гордеев И. В.//Физика низких температур. 1975. Т. 1. С. 1540—1542.
80. Busch G., Magyar B., Wachter P.//Phys. Lett. 1966. Vol. 23. P. 438—440.
81. Sato K., Teranishi T.//J. Phys. Soc. Japan. 1970. Vol. 29. P. 523—524.
82. Jarsen P. K., Wittekoek S. W.//Phys. Rev. Lett. 1972. Vol. 29. P. 1597—1599.

83. Shepherd I. W.//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 1835—1838.
84. Hlilek P., Polivka V. e. a.//Proc. 10-th. Congr. ICO. Prague, 1975. P. 320—325.
85. Harbeck G., Pinch H. L.//Phys. Rev. Lett. 1966. Vol. 17. P. 1090—1093.
86. Wen C. P., Hershenov B., Philipsborn H., Pinch H. L.//Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 13. P. 188—190.
87. Haas C.//IBM J. Res. Develop. 1970. Vol. 14. P. 282—288.
88. Minematsu K., Miyatani K., Takahashi T.//J. Phys. Soc. Jap. 1971. Vol. 31. P. 123—129.
89. Stoyanov S. G., Iliev M. N., Stoyanova S. P.//Solid State Commun. 1976. Vol. 18. P. 1389—1392.
90. Goodenough J. B.//J. Phys. Chem. Solids. 1969. Vol. 30. P. 261—280.
91. Голик Л. Л., Григорович С. М., Кунькова З. Э. и др.//Физика твердого тела. 1975. Т. 16. С. 2151—2153.
92. Балкарей Ю. И., Бару В. Г., Голик Л. Л.//Микроэлектроника. 1976. Т. 5. С. 475—488.
93. Moser F., Ahrenkiel R. K., Carnall E. e. a.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 1449—1451.
94. Bongers P. F., Zanmarchi G.//Solid State Commun. 1968. Vol. 6. P. 291—294.
95. Lee T. H., Coburn T., Gluck R.//Ibid. 1971. Vol. 9. P. 1821—1824.
96. Ahrenkiel R. K., Coburn T. J., Carnall E.//IEEE Trans. Magnet. 1974. Vol. MAG-10. P. 2—7.
97. Menzer G.//Z. Kristallogr. 1928. Bd. 69. S. 300—396.
98. Gibbs G. V., Smith J. V.//Amer. Mineral. 1965. Vol. 50. P. 2023—2028.
99. Prandl W.//Z. Kristallogr. 1966. Bd. 123. S. 81—116.
100. Abrahams S. C., Geller S.//Acta crystallogr. 1958. Vol. 11. P. 437.
101. Callen E.//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 519—527.
102. Кирюхин В. П., Соколов В. И.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. С. 428—432.
103. Le Craw R. C., Comstock R. L.//Physical Acoustics. Vol. III. P. B. Lattice Dynamics//Ed. W. P. Mason. N. — Y. — Lond.: Academic Press. 1965.
104. Wickersheim K. A.//Magnetism/Ed. G. Rado and H. Suhl. Academic Press. 1963.
105. Tinkham H.//J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, Suppl. P. 1248—1253.
106. Wood D. L., Remeika J. P.//Ibid. 1967. Vol. 38. P. 1038—1045.
107. Dillon J. F. Jr.//J. Phys. et radium. 1959. Vol. 20. P. 374—377.
108. Кринчик Г. С., Четкин М. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. С. 729—733; Т. 41. С. 673—680.
109. Писарев Р. В., Синий И. Г., Смоленский Г. А./Письма ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 112—114, 264—266; 1969. Т. 57. С. 737—741.
110. Dillon J. F.//J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1230—1234.
111. Geller S.//Z. Kristallogr. 1967. Bd. 125, N° 1. S. 1—47.
112. Geller S., Gilleo M. A.//J. Phys. Chem. Solids. 1957. Vol. 3. P. 30.
113. Euler F., Bruce J. A.//Acta Cryst. 1965. Vol. 19. P. 971—975.
114. Bonnet M., Delapalme A., Fuess H., Thomas M.//Acta crystallogr. 1975. Vol. B31. P. 2233—2240.
115. Эмиряев А., Кочаров А. Г., Бакрадзе Р. В. и др. Кристаллография. 1976. Т. 21. С. 391—392.
116. Espinosa G. P.//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 37. P. 2344—2347.
117. Strocka B., Holst P., Tolsdorf W.//Philips Journ. Res. 1978. Vol. 33. P. 186.
118. Tcheou F., Fuess H., Bertaut E. E.//Solid St Commun. 1970. Vol. 8. P. 1745—1758.
119. Winkler G. Magnetic Garnets. I Vieweg and Sohn: Braunschweig/Wiesbaden. 1981.
120. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш.//Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М.: Советское радио, 1975.
121. Филиппов В. В., Шильников Ю. Р., Яковлев Ю. М., Салыганов В. И.//Материалы научно-технической информации/Синтез и исследование ферромагнитных кристаллов. М. ЦНИИ «Электроника». 1970. Вып. 9 (25). С. 34—37.
122. Яковлев Ю. М., Шильников Ю. Р., Галактионова Г. М. и др.//Ферритовые СВЧ приборы и материалы. ЦНИИ «Электроника», 1972. С. 188—193.
123. Clark A. E., Desavage B., Coleman W. e. a.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1296—1297.
124. Петраковский Г. А., Смокотин Э. М., Титова А. Г.//Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 2324—2329.
125. Смокотин Э. М., Петраковская Э. А., Саблина К. А.//Тонкие магнитные пленки, вычислительная техника и радиотехника. Красноярск, 1970. Т. 2. 127—130.
126. Mandel V. S., Smokotin E. M., Petrakovskii G. A., Lebed V. M.//Phys. Stat. Solidi. 1968. Vol. 30. P. K111—K113.
127. Philips T. G., White R. L.//Phys. Rev. Letts. 1966. Vol. 16. P. 650—651.
128. Яковлев Ю. М., Галактионова Г. М., Бурдин Ю. И., Петров Р. А.//Электронная техника Сер. 7. Ферритовая техника. 1968. № 4 (16). С. 26—41.
129. Яковлев Ю. М., Шильников Ю. Р., Галактионова Г. М., Салыганов В. И.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 110—113.
130. Van der Kraan A. M., Van Loef J. J.//Proc. Conf. Tihany. 1971. Application of Mössbauer effect. Tichany. 1971. P. 519.
131. Heller P., Benedek G. B.//Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 8. P. 428—432.
132. Eastman D. E.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2312—2316.
133. Bateman T. B.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2194—2195.
134. Spencer E. G., Denton R. T., Bateman T. B. e. a.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3059—3060.
135. Alton W. J., Barlow A. J.//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023—3024.
136. Петраковский Г. А.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. Т. 34. P. 1052—1063.
137. Spencer E. G., Denton R. T., Bateman T. B. e. a.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3059—3060.
138. Alton W. J., Barlow A. J.//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023—3024.
139. Haussühl S., Mateika D.//Z. Naturforsch. 1972. Bd. 27a. S. 1522—1523.
140. Graham L. J., Chang R.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2247—2248.
141. Haussühl S., Mateika D., Tolsdorf W.//Z. Naturforsch. 1976. Bd. 31a. S. 390—392.
142. Генделев С. Ш., Щербак Н. Г.//Кристаллография. 1965. Vol. 10. P. 708.
143. Hergt R., Gönert R.//Phys. Stat. Solidi(a). 1974. Vol. 21. P. 77—86.
144. Дедух Л. М., Никитенко В. И.//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. Т. 34, № 6. С. 1235—1239.
145. Slack G. A., Oliver D. W.//Phys. Rev. 1971. Vol. 4B. P. 592—609.
146. Щелкотунов В. А., Данилов В. Н., Калачева В. С.//Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1976. Vol. 12. P. 1076—1079.

147. Verweel J.//Proc. IEEE B 109, Suppl. 1962. Vol. 21. P. 95.
148. Belhe K., Verweel J.//IEEE Trans. Magn. 1969. Vol. Mag-5. P. 474.
149. Johnson B., Walton A. K.//Brit. Journ. Appl. Phys. 1965. Vol. 16. P. 475.
150. Darai J., Ferrand B., Geynet J. e. a.//IEEE Trans. Magn. 1975. Vol. Mag-11, N° 5. P. 115—117.
151. Röschmann P., Hansen P.//J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. P. 6257—6269.
152. Geller S. Physics of Magnetic Garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam: North-Holland. 1978. P. 1—55.
153. Tolksdorf W.//Physics of magnetic garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam. North-Holland. Publ. Comp. 1978. P. 521—539.
154. Geller S., Remeika J. P., Sherwood R. C. e. a.//Phys. Rev. 1965. Vol. 137. P. 1034—1038.
155. Geller S., Williams H. J., Sherwood R. C. e. a.//Phys. Rev. 1963. Vol. 131. P. 1080—1082.
156. Hansen P.//Philips. Res. Rep. Suppl. 1970. N° 7. P. 1—6.
157. Hansen P.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 3638—3642.
158. Scott G. B.//Physics of Magnetic Garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam: North-Holland. Publ. Comp. 1978. P. 445—466.
159. Галуза А. И., Еременко В. В., Кириченко А. П.//Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 585—587.
160. Wemple S. H., Blank S. L., Seman J. A., Biondi W. A.//Phys. Rev. 1974. Vol. B9, P. 2134—2144.
161. Писарев Р. В., Синий И. Г., Колпакова Н. Н., Яковлев Ю. М.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1971. Т. 60. С. 2188—2202.
162. Geller S., Williams H. J., Espinosa G. P., Sherwood R. C.//Bell Syst Techn. J. 1964. Vol. 43. P. 565—623.
163. Яковлев Ю. М., Лебедь Б. М.//Физика твердого тела. 1962. Т. 4. С. 3654—3662.
164. Jonker G. H., Wijn H. P. J., Broun P. B.//Philips Techn. Rev. 1956/57. Vol. 18. P. 145—147.
165. Braun P. B.//Philips Res. Repts. 1957. Vol. 12. P. 491—548.
166. Ситидзе Ю., Сато Х. Ферриты/Пер. с япон. М.: Мир, 1964.
167. Kohn J. A., Eckart D. W.//Z. Kristallogr. 1964. Bd. 119. S. 454—464.
168. Kohn J. A., Eckart D. W.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 968—969.
169. Levine B. F., Nowlin C. H., Jones R. V.//Phys. Rev. 1968. Vol. 174. P. 571—582.
170. Villers G.//Compt. rend. Acad. Sci. 1959. Vol. 248. P. 1974.
171. Pauthenet R., Rimet G.//Ibid. 1959. Vol. 249. P. 565.
172. Kojima H.//Sci. Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ. 1955. Vol. A7. P. 502.
173. Tauber A., Kohn J. A., Savage R. O.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1265.
174. Savage R. O., Dixon S., Tauber A.//Ibid. 1965. Vol. 36. P. 873.
175. Taft D. R.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 776.
176. Okazaki T., Yutaka H.//Electronics and Communications in Japan. 1974. Vol. 57, N° 7. P. 188.
177. Dillon J. F., Kamimura H., Remeika J. P.//J. Phys. Chem. Solid. 1966. Vol. 27. P. 1531.
178. Sugawara F., Iida H., Syono Ya., Akimoto S.//J. Phys. Soc. Japan. 1968. Vol. 25. P. 1553—1558.
179. Боков В. А., Мыльникова И. Е., Кизяев С. А. и др.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 3695—3698.
180. Bertaut E. F., Forrat F.//J. Appl. Phys. 1958. Vol. 29. P. 247—248.
181. Cloud W. H.//Phys. Rev. 1958. Vol. 111. P. 1046—1049.
182. Bozorth R. M., Walsh D. E.//J. Phys. Chem. Solid. 1958. Vol. 5. P. 299.
183. Knox K., Geller S.//Phys. Rev. 1958. Vol. 110. P. 771—772.
184. Shafer M. W., McGuire T. R.//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 984—988.
185. Shafer M. W.//Ibid. 1965. Vol. 36. P. 1145—1152.
186. Boyd E. L., Moruzzi V. L., Smart I. S.//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3049—3054.
187. Gonano R., Hunt E., Meyer H.//Phys. Rev. 1967. Vol. 156. P. 521—533.
188. Litster J. D., Benedek G. B.//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 1320—1322.
189. Prince E.//Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 1845—1847.
190. Geller S.//Phys. Rev. 1969. Vol. 181. P. 980—985.
191. Зотов Т. Д., Сукровцева М. М.//Физика твердого тела. 1964. Т. 11. С. 649—652.
192. Andersen E. E.//Phys. Rev. 1964. Vol. 134. P. A1581—A1585.
193. Hansen P., Röschmann P., Tolksdorf W.//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 2728.
194. Plant J. S.//J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 7037—7051.

## Глава 30

# ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Н. А. Бабушкина

### 30.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Гальваномагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, по которому протекает электрический ток.

Термомагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, внутри которых имеется тепловой поток.

Наиболее характерные черты этих явлений связаны с воздействием индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$  на траектории движения носителей тока, которые искривляются из-за силы Лоренца и представляют собой спирали с образующей вдоль  $\mathbf{B}$ . Если потоки теплоты и заряда

распространяются вдоль  $\mathbf{B}$ , то возникают продольные гальвано- и термомагнитные эффекты (ГМЭ и ТМЭ). Магнитное поле не меняет продольную составляющую импульса электрона, поэтому влияние его в этом случае невелико и продольные ГМЭ и ТМЭ для всех металлов невелики и заключаются соответственно в небольшом (порядка 1) увеличении электро- и теплопроводности.

Если потоки теплоты и зарядов направлены перпендикулярно  $\mathbf{B}$  ( $\mathbf{q} \perp \mathbf{B}$ ,  $\mathbf{j} \perp \mathbf{B}$ ), то возникают поперечные ГМЭ и ТМЭ. При этом, вообще говоря, направления электрического поля  $\mathbf{E}$  и градиента температуры  $\nabla T$  не совпадают с заданными направлениями векторов плотности тока  $\mathbf{j}$  и потока тепла  $\mathbf{q}$  (для определенности будем счи-

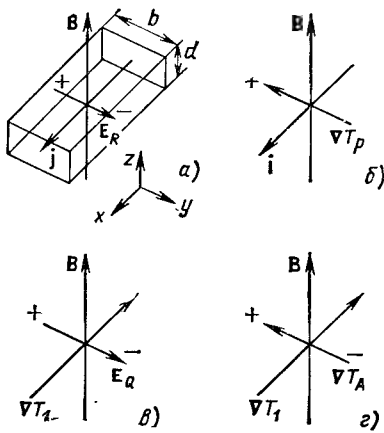


Рис. 30.1. Схемы ориентации векторов  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\nabla T$ : а — для эффекта Холла; б — для эффекта Эттингсгаузена; в — для эффекта Нернста; г — для эффекта Риги — Ледюка

тать потоки  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{q}$  направленными вдоль оси  $x$ , а магнитное поле — вдоль оси  $z$ , рис. 30.1).

В общем случае связь между величинами  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\nabla T$  и  $\mathbf{q}$  тензорная:

$$\mathbf{j} = \hat{\sigma} \mathbf{E} - \hat{\eta} \nabla T; \quad \mathbf{q} = -\hat{T} \hat{\sigma} \mathbf{E} - \hat{\chi} \nabla T,$$

где  $\hat{\sigma}$ ,  $\hat{\chi}$ ,  $\hat{\eta}$  — тензоры соответственно электропроводности, термо-ЭДС, теплопроводности, термоэлектрического тока ( $\hat{\eta} = \hat{\sigma} \hat{S}$ ).

Если  $\mathbf{j} \perp \mathbf{B}$ , то:

1) в направлении, перпендикулярном к  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{B}$ , возникает электрическое поле (эффект Холла)  $E_R = R j B$ , где  $R$  — коэффициент Холла (рис. 30.1, а);

2) в направлении  $\mathbf{j}$  изменяется электрическое сопротивление  $\rho$ . При этом  $\rho_{xx} = E_x / j_x$  называют *магнитосопротивлением* (МС);

3) в направлении, перпендикулярном к  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{B}$ , возникает температурный градиент (эффект Эттингсгаузена)  $\nabla T_R = P j B$ , где  $P$  — коэффициент Эттингсгаузена (рис. 30.1, б).

Если  $\mathbf{q} \perp \mathbf{B}$ , то:

1) в направлении, перпендикулярном первичному градиенту температур  $\nabla T_1$  и  $\mathbf{B}$ , возникает электрическое поле (эффект Нернста)  $E_Q = Q B \nabla T_1$ , где  $Q$  — коэффициент Нернста (рис. 30.1, в);

2) в направлении, перпендикулярном первичному градиенту температур  $\nabla T_1$  и  $\mathbf{B}$ , возникает градиент температур (эффект Риги — Ледюка)  $\nabla T_A = A B \nabla T_1$ , где  $A$  — коэффициент Риги — Ледюка (см. рис. 30.1, г);

3) в направлении первичного теплового потока изменяется теплопроводность.

Поведение ГМЭ и ТМЭ существенно различается (качественно и количественно) в областях слабого и сильного магнитных полей. Граница между этими областями определяется безразмерной величиной  $\omega \tau$ , где  $\omega = e B / (m^* c)$  — циклотронная частота вращения электрона с эффективной массой  $m^*$ ;  $\tau$  — время между актами рассеяния.

В слабых магнитных полях  $\omega \tau \ll 1$  для всех металлов  $\rho_{xx} \propto B^2$  и  $\Delta \rho / \rho \ll 1$ , где  $\Delta \rho = \rho(B) - \rho(0)$ ,  $\rho \equiv \rho(0)$ ;  $R = 1 / (n e)$ , где  $n$  — концентрация носителей тока;  $e$  — заряд носителей тока, равный  $e = -1,6 \cdot 10^{-9}$  Кл.

Условие  $\omega \tau \gg 1$  определяет область сильных магнитных полей, где асимптотики ГМЭ и ТМЭ определяют

топологической поверхности Ферми (ПФ) и существенно различаются как для различных металлов, так и для различных ориентаций монокристаллов одного и того же металла.

ПФ — поверхность в импульсном пространстве, разграничивающая при  $T=0$  заполненные и свободные электронные состояния.

Условие  $\omega \tau \gg 1$  выполняется обычно при низких температурах ( $T \sim 4$  К) в чистых образцах ( $R$  (300 К) /  $R$  (4,2 К)  $\sim 10^3$ ).

Связь топологии поверхности Ферми и гальваномагнитных эффектов. В случае  $\omega \tau \gg 1$  траектория движения электрона в магнитном поле описывается уравнениями  $\epsilon = \text{const}$  ( $\epsilon$  — энергия) и  $p_z = \text{const}$  ( $p_z$  — проекция импульса на направление магнитного поля), что соответствует линии сечения ПФ в импульсном пространстве (пространстве скоростей) плоскостью, перпендикулярной магнитному полю. Если ПФ замкнутая, то все траектории в реальном пространстве — замкнутые орбиты, подобные сечению ПФ в импульсном пространстве и поверхности на  $\pi/2$ . Если ПФ — многосвязная бесконечная поверхность, то кроме замкнутых сечений имеются открытые траектории, которым в реальном пространстве соответствует движение электрона в направлении, повернутом на угол  $\pi/2$  относительно направления открытости в пространстве скоростей.

Если ПФ замкнутая и  $\omega \tau \gg 1$ , то в электрическом поле  $\mathbf{E}$  все электроны дрейфуют со скоростью  $\mathbf{v}_H = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$ , что приводит к появлению недиссипативного

тока и определяет эффект Холла и недиагональную компоненту тензора проводимости  $\sigma_{xy} = n e / B \equiv \sigma_0 / (\omega \tau \propto B^{-1})$  ( $\sigma_0 = n e^2 \tau / m$  — проводимость без магнитного поля). В направлении электрического поля перенос заряда осуществляется посредством диффузии центров орбит, т. е. герескоков электронов при рассеянии на соседнюю орбиту. Это приводит к появлению диссипативного тока и определяет соответствующую диагональную компоненту тензора проводимости  $\sigma_{xx} \approx \sigma_0 / (\omega \tau)^2 \propto B^2$ . Электроны на незамкнутых (открытых) орбитах в дрейфовом токе не участвуют. Для них проводимость в направлении открытости такая же, как и без магнитного поля, т. е. в данном случае  $\sigma_{xx} \approx \sigma_0$ .

При наличии перекрытия двух последовательных энергетических зон, из которых нижняя была бы полностью заполнена, происходит перетекание электронов из одной зоны в другую. При этом концентрация пустых (дырочных) состояний  $n_2$  в одной из зон совпадает с концентрацией заполненных (электронных) состояний  $n_1$  в другой зоне. Такой металл принято называть компенсированным ( $n_1 = n_2$ ). Дрейфовый ток в нем в первом приближении отсутствует. В случае замкнутых ПФ можно с определенностью говорить либо об электронном ее характере, если внутри находятся заполненные состояния, либо о дырочном, если она окружает пустые состояния. В этом случае, если  $n_1 = n_2$ , все компоненты тензора проводимости определяются диффузией центров орбит, т. е.  $\sigma_{xx} \sim \sigma_{yy} \approx \sigma_0 / (\omega \tau)^2 \propto B^2$ . (На незамкнутой, а также многосвязной ПФ возможны как дырочные, так и электронные орбиты.) Приведенные выражения для компонент тензора проводимости исчерпывающим образом описывают все многообразие возможных асимптотик поведения гальваномагнитных свойств металлов.

В эксперименте определяют МС, т. е.  $\rho_{xx} = \frac{E_x}{j_x} = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xx} \sigma_{yy}}$ , и холловское сопротивление, т. е.  $\rho_{xy} = \frac{E_y}{j_x} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xx} \sigma_{yy}} = R B$ , где  $R$  — коэффициент Холла, который, однако, не для всех металлов яв-



ляется константой. При этом количественно МС определяется величиной  $\omega t$  (а не собственно индукцией магнитного поля  $B$ ), этим обусловлено так называемое эмпирическое *правило Колера*, согласно которому МС определяется магнитным полем  $\left(\frac{\rho(B)}{\rho(0)} = f\left(\frac{B}{\rho(0)}\right)\right)$ .

На рис. 30.3—30.22 приведены основные топологические типы ПФ, а в табл. 30.2 — данные о топологии ПФ металлов и ряда сплавов:

1. Для однозонных металлов с замкнутой ПФ (щелочные металлы) —  $\rho_{xx} \sim \text{const } \sigma_0^{-1}$  — МС не зависит от  $B$ , и принято говорить о *насыщении* МС, а  $\rho_{xy} = \frac{1}{ne} B$ , т. е. коэффициент Холла  $R = 1/(ne)$ . В этом случае значение коэффициента Холла оказывается таким же, как и для области слабых магнитных полей  $\omega t \ll 1$ .

2. Для однозонных металлов с открытой ПФ (благородные металлы)  $\rho_{xx} \sim \sigma_0^{-1}(\omega t)^2 \propto B^2$  в тех ориентациях  $B$  относительно осей кристалла, в которых открытые траектории возникают вдоль оси  $y$  (перпендикулярно току) в реальном пространстве, т. е. когда  $\sigma_{yy} \sim \sigma_0$ .

В остальных направлениях  $\rho_{xx}$  насыщается. На диаграмме вращения (изменение МС в зависимости от ориентации  $B$  относительно осей кристалла) МС почти везде невелико и имеют место острые максимумы, соответствующие открытым траекториям.

3. Для компенсированных металлов ( $n_1 = n_2$ ) с замкнутыми ПФ (бериллий, молибден, вольфрам, полуметаллы)  $\rho_{xx} \sim \sigma_0^{-1}(\omega t)^2 \propto B^2$  для всех направлений. Небольшая анизотропия, не зависящая от  $B$ , обусловлена несферичностью ПФ. Эффект Холла (и соответственно «коэффициент Холла») — сложная функция  $B$ ,  $T$  и ориентации кристалла.

4. Для компенсированных металлов с открытой ПФ (магний, цинк, кадмий, олово, свинец и др.)  $\rho_{xx} \sim \sigma_0^{-1}$ , т. е. не зависит от  $B$  (насыщается) в тех ориентациях  $B$ , когда открытые траектории возникают вдоль оси  $x$  (параллельно току) в реальном пространстве, т. е. когда  $\sigma_{xx} \sim \sigma_0$ . В остальных направлениях  $\rho_{xx} \propto B^2$ . На диаграмме вращения МС почти везде велико и имеют место острые минимумы, соответствующие открытым траекториям.

5. Для многозонных некомпенсированных металлов ( $n_1 \neq n_2$ ) с замкнутыми и открытыми ПФ (индий, алюминий, галлий, таллий) асимптотики  $\rho_{xx}$  такие же, как и в п. 1 и 2, а  $\rho_{xy} = \frac{1}{ne} B$ , где  $n = n_1 - n_2$ , за исключением

отдельных ориентаций, когда следует учитывать геометрическую раскомпенсацию на многосвязных ПФ.

Во многих многозонных металлах в сильном магнитном поле становится возможным переход электронов на ПФ из одной зоны проводимости в соседнюю — так называемый магнитный пробой. Это приводит к новым траекториям и, таким образом, существенно влияет на гальваномагнитные эффекты.

Наиболее подробно топология поверхности Ферми рассмотрена в [1—3].

Основные теоретические и экспериментальные представления о магнитосопротивлении металлов имеются в [4—6]. В табл. 30.3, 30.4 и на рис. 30.24—30.53 приведены основные данные о МС металлов. Следует заметить, что при температуре 20°C и обычно используемых значениях магнитной индукции  $B \sim 1$  Тл ( $\omega t \ll 1$ )  $\Delta\rho/\rho$  для большинства металлов весьма мало. Например, для меди  $\Delta\rho/\rho \approx 10^{-4}$  при  $B = 2$  Тл. Исключением является висмут, для которого  $\Delta\rho/\rho \approx 2$  при  $B = 3$  Тл.

Эффект Холла. Основные теоретические и экспериментальные данные об эффекте Холла представлены в [7]. Коэффициент Холла  $R$  в металлах может быть поло-

жительным и отрицательным и даже менять знак с изменением температуры. В области высоких и промежуточных температур для большинства металлов он практически не зависит от температуры. Основные данные об эффекте Холла в металлах приведены в табл. 30.5 и на рис. 30.54—30.69.

В ферромагнетиках на электроны проводимости воздействует магнитное поле, отличное от внешнего. При этом наблюдается особый, ферромагнитный эффект Холла. Для ферромагнетиков экспериментально найдено, что поле Холла

$$E_R = \mu_0 j (R_0 H + R_1 M), \quad (30.1)$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $M$  — намагниченность образца;  $j$  — плотность тока, протекающего через образец;  $R_0$  и  $R_1$  — обыкновенный и необыкновенный (аномальный) коэффициенты Холла.

Последнее соотношение с учетом равенства  $B = \mu_0(H + M)$  можно записать в виде

$$\epsilon = U_R d/I = R_0 B + R_S M \mu_0, \quad (30.2)$$

где  $\epsilon$  — нормированное на полный ток  $I$  и толщину образца  $d$  измеряемое в эксперименте напряжение Холла  $U_R$ ;  $R_S = R_1 - R_0$  — так называемый спонтанный или ферромагнитный коэффициент Холла. Для большинства ферромагнитных металлов  $R_S \approx R_1$ .

Из этого выражения определяют коэффициенты Холла, используя экспериментальные зависимости  $\epsilon(B)$  (рис. 30.2).

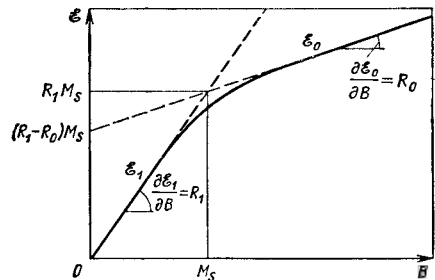


Рис. 30.2. Зависимость ЭДС Холла  $\epsilon$  от магнитной индукции для ферромагнитной пластинки. Определение обыкновенного  $R_0$  и аномального  $R_1$  коэффициентов Холла

Обычно  $R_S \gg R_0$  и сильно зависит от температуры. С повышением температуры спонтанный коэффициент Холла  $R_S$  возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем падает. В парамагнитной области температур эффект Холла определяется соотношением

$$\epsilon = R^* H,$$

где  $R^* = R_0 + \chi R_S = R_0 + R_P$ ,  $\chi$  — магнитная восприимчивость вещества;  $R_P$  — парамагнитный коэффициент Холла — Кикоина.

Значения гальваномагнитных коэффициентов ферромагнитных металлов приведены в табл. 30.7.

Термомагнитные эффекты в ферромагнетиках определяются по формулам:

эффект Эттингсгаузена

$$\partial T_P / \partial y = (P_0 B + P_1 M \mu_0) j;$$

эффект Риги — Ледюка

$$\partial T_A / \partial y = (A_0 B + A_1 M \mu_0) \quad \partial T_A / \partial x;$$

эффект Нернста

$$\partial U_Q / \partial y = (Q_0 B + Q_1 M \mu_0) j.$$

Таблица 30.1. Таблица перевода коэффициентов гальвано- и термомагнитных явлений из СИ в практическую систему

| Величина                   | Обозначение | Система СИ                               | Практическая система (внесистемные единицы) |
|----------------------------|-------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Магнитная индукция         | $B$         | $\frac{Вб}{м^2} = \frac{В \cdot с}{м^2}$ | $10^4$ Гс                                   |
| Коэффициент Холла          | $R$         | $\frac{м^3}{К} = \frac{м^3}{А \cdot с}$  | $10^{-2} \frac{В \cdot см}{А \cdot Гс}$     |
| Коэффициент Эттингсгаузена | $P$         | $\frac{К \cdot м^3}{В \cdot А \cdot с}$  | $10^{-2} \frac{К \cdot см}{А \cdot Гс}$     |
| Коэффициент Риги—Ледюка    | $A$         | $\frac{м^2}{В \cdot с}$                  | $10^{-4} Гс^{-1}$                           |
| Коэффициент Нернста        | $Q$         | $\frac{м^2}{К \cdot с}$                  | $10^{-4} \frac{В}{К \cdot Гс}$              |

В ферромагнитных металлах зависимость  $\rho$  от напряженности магнитного поля также имеет ряд особенностей, которые обусловлены наличием в этих веществах самопроизвольной намагниченности. В больших магнитных полях (когда происходит техническое насыщение материала) сопротивление с ростом напряженности поля всегда уменьшается независимо от направления магнитного поля по отношению к току.

В таблицах и рисунках этой главы принято обозначение  $RRR = \rho(300 К) / \rho(4,2 К)$ . Этот параметр определяет чистоту образца.

Значения всех гальвано- и термомагнитных коэффициентов даны в СИ. Для перевода в другие системы единиц следует пользоваться табл. 30.1. Следует иметь в виду, что напряженность внешнего магнитного поля, равная в системе СГС 10 кЭ, соответствует индукции внешнего магнитного поля в системе СИ,  $B \equiv \mu_0 H = 1$  Тл, где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м  $= 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м — магнитная постоянная.

## 30.2. ТОПОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.2 и на рис. 30.3—30.23 приведены сведения о топологии поверхности Ферми для различных металлов [1].

Таблица 30.2. Топология поверхности Ферми металлов [1]

| Металл    | Кристаллическая решетка             | Топологический тип и другие сведения о поверхности Ферми                                                                                                                                                       |
|-----------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Алюминий  | ГЦК                                 | $n_1 \neq n_2$ ; $B < 3,0$ Тл, закрытая; $B > 3,0$ Тл, магнитный пробой, рис. 30.7                                                                                                                             |
| Бериллий  | ГПУ                                 | $n_1 = n_2$ ; $B < 5,0$ Тл, закрытая; $B > 5,0$ Тл, магнитный пробой в базисной плоскости, рис. 30.4                                                                                                           |
| Ванадий   | ОЦК                                 | $n_1 \neq n_2$ , рис. 30.17                                                                                                                                                                                    |
| Висмут    | Ромбоэдрическая                     | $n_1 = n_2$ , закрытая; рис. 30.23                                                                                                                                                                             |
| Вольфрам  | ОЦК                                 | $n_1 = n_2$ , закрытая; рис. 30.18                                                                                                                                                                             |
| Гадолиний | ГПУ                                 | —                                                                                                                                                                                                              |
| Галлий    | Объемноцентрическая орторомбическая | $n_1 = n_2$ , открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси $c$ , рис. 30.9                                                                                                                                       |
| Графит    | ОЦК                                 | Закрытая — самопересечение,                                                                                                                                                                                    |
| Железо    | ОЦК                                 | $n_1 = n_2$ ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров по осям [001]                                                                                                                          |
| Золото    | ГЦК                                 | $n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$ , открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров по осям [111] (основное открытое направление) и осям [110] и [100] (вторичные открытые направления), рис. 30.13 |
| Индий     | Тетрагональная                      | $n_1 = n_2$ , закрытая                                                                                                                                                                                         |
| Иттербий  | ГЦК                                 | Закрытая                                                                                                                                                                                                       |
| Итрий     | ГПУ                                 | Открытая (расчет)                                                                                                                                                                                              |
| Кадмий    | ГПУ                                 | $n_1 = n_2$ , открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001], рис. 30.14                                                                                                                                    |
| Калий     | ОЦК                                 | $n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$ ; закрытая (сфера), рис. 30.3                                                                                                                                               |
| Кальций   | ГЦК                                 | Открытая (расчет), рис. 30.6; подобна поверхности Ферми свинца (рис. 30.11)                                                                                                                                    |
| Кобальт   | ГЦК                                 | Рис. 30.20                                                                                                                                                                                                     |
| Литий     | ОЦК                                 | $n_1 \neq n_2$ , закрытая (сфера)                                                                                                                                                                              |
| Магний    | ГПУ                                 | $n_1 = n_2$ , открытая, $B > 0,5$ Тл, магнитный пробой в плоскости [0001], рис. 30.5                                                                                                                           |
| Медь      | ГЦК                                 | $n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$ ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота, рис. 30.13                                                  |
| Молибден  | ОЦК                                 | $n_1 = n_2$ , закрытая, рис. 30.18                                                                                                                                                                             |
| Мышьяк    | Ромбоэдрическая                     | $n_1 = n_2$ ; закрытая, рис. 30.12                                                                                                                                                                             |

| Металл                                | Кристаллическая решетка | Топологический тип и другие сведения о поверхности Ферми                                                                                                                               |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Натрий                                | ОЦК                     | $n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$ ; закрытая — сфера (см. калий)                                                                                                                      |
| Никель                                | ГЦК                     | $n_1 = n_2$ ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота                                                             |
| Ниобий                                | ОЦК                     | $n_1 \neq n_2$ ; магнитный пробой, открытая — сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001], [110] и [111], рис. 30.17                                                                |
| Олово                                 | Тетрагональная          | $n_1 = n_2$ ; открытая — плоская сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [010] и [110], рис. 30.10 $B > 5,0$ Тл, магнитный пробой                                                     |
| Осмий                                 | ГПУ                     | $n_1 = n_2$ ; открытая — плоская сетка гофрированных цилиндров, параллельных плоскости [0001] и оси [0001], магнитный пробой                                                           |
| Палладий                              | ГЦК                     | $n_1 = n_2$ ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001], рис. 30.22                                                                                   |
| Платина                               | ГЦК                     | $n_1 = n_2$ ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001]; подобна поверхности Ферми палладия                                                           |
| Рений                                 | ГПУ                     | $n_1 = n_2$ ; открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001]; $B > 3,0$ Тл, магнитный пробой; появляются дополнительные открытые направления вдоль осей [0001] и [1010], рис. 30.19 |
| Родий                                 | ГЦК                     | Закрытая (расчет), рис. 30.21                                                                                                                                                          |
| Ртуть                                 | Ромбоэдрическая         | $n_1 = n_2$ ; открытая — открытые направления параллельны осям [100] и [011], рис. 30.16                                                                                               |
| Рубидий                               | ОЦК                     | $n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$ ; закрытая сфера (см. калий)                                                                                                                        |
| Рутений                               | ГПУ                     | Открытая, магнитный пробой                                                                                                                                                             |
| Свинец                                | ГЦК                     | $n_1 = n_2$ ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111], рис. 30.11                                                                                   |
| Серебро                               | ГЦК                     | $n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$ ; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота                                      |
| Скандий                               | Полиморфная ГЦК, ГПУ    | $n_1 \neq n_2$ , закрытая                                                                                                                                                              |
| Стронций                              | Полиморфная             | Открытая (расчет)                                                                                                                                                                      |
| Сурьма                                | Ромбоэдрическая         | $n_1 = n_2$ , закрытая                                                                                                                                                                 |
| Таллий                                | ГПУ                     | $n_1 \neq n_2$ , открытая; две гофрированные плоскости [0001], соединенные узкими перемычками вдоль оси [0001]; рис. 30.8, $B > 3,0$ Тл; магнитный пробой                              |
| Тантал                                | ОЦК                     | $n_1 = n_2$ , открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001]; подобна поверхности Ферми ниобия                                                             |
| Титан                                 | ГПУ                     | $n_1 = n_2$ , закрытая                                                                                                                                                                 |
| Торий                                 | Полиморфная             |                                                                                                                                                                                        |
| Хром                                  | ОЦК                     | $n_1 = n_2$ , закрытая (см. рис. 30.18); в антиферромагнитном хrome $B > 6,0$ Тл, магнитный пробой вдоль [100]                                                                         |
| Цезий                                 | ОЦК                     | $n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$ ; закрытая — сфера (см. калий)                                                                                                                      |
| Цинк                                  | ГПУ                     | $n_1 = n_2$ , открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001]; рис. 30.15, $B > 0,25$ Тл; магнитный пробой, проявляются открытые направления вдоль осей [1210] и [1010]              |
| Цирконий                              | ГПУ                     | Открытая (расчет)                                                                                                                                                                      |
| AuSn                                  | Гексагональная          | Открытая                                                                                                                                                                               |
| AuAl <sub>2</sub>                     | ГЦК                     | Открытая, аналогична по топологии поверхности Ферми золота                                                                                                                             |
| AgZn, CuZn, PdIn                      | $\beta$ -латунь         | Открытые (расчет)                                                                                                                                                                      |
| AuGa <sub>2</sub> , AuIn <sub>2</sub> | ГЦК                     | Открытые, аналогичны по топологии поверхности Ферми золота                                                                                                                             |
| MgZn <sub>2</sub>                     | Гексагональная          |                                                                                                                                                                                        |

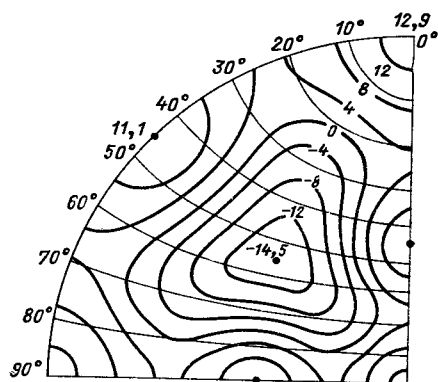


Рис. 30.3. Поверхность Ферми для К [2]. Проведены контуры отклонения поверхности Ферми от сферы в единицах  $10^4 \Delta r/r_1$ , где  $r$  — радиус сферы. (Значения  $\Delta r/r$  для других щелочных металлов качественно такие же)

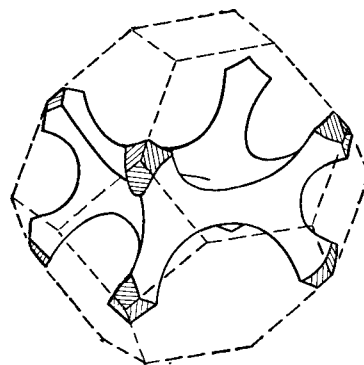


Рис. 30.6. Многосвязная дырочная поверхность Ферми для Са в первой зоне (Модель Харрисона) [2]

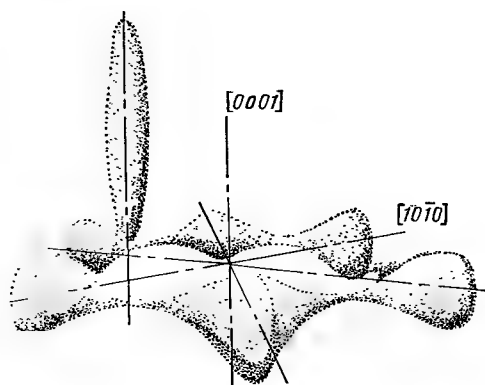


Рис. 30.4. Поверхность Ферми для Ве («сигара» и «корона») [2]

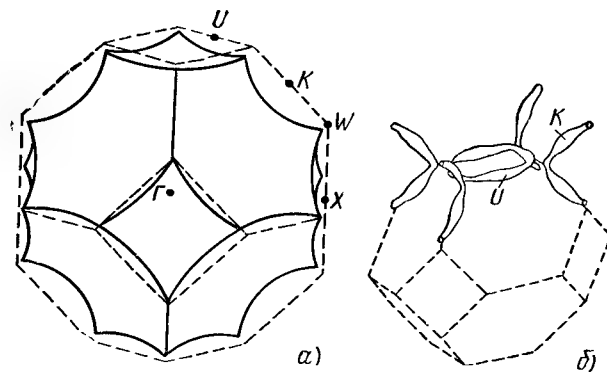


Рис. 30.7. Дырочная поверхность Ферми для Al во второй зоне [3] (a) и электронная поверхность Ферми для Al в третьей зоне (модель Ашкрофта) [2] (б)

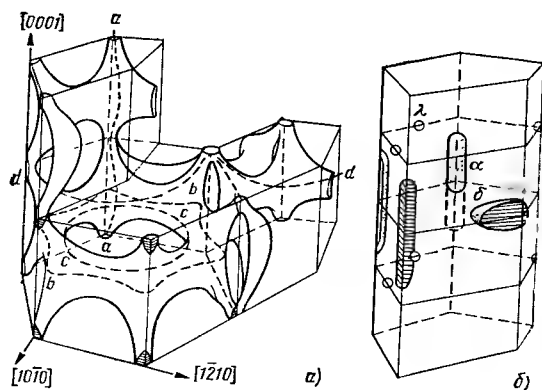


Рис. 30.5. Поверхность Ферми для Mg: а — многосвязная дырочная поверхность во второй зоне [6]; б — электронная поверхность в третьей и четвертой зонах [2]

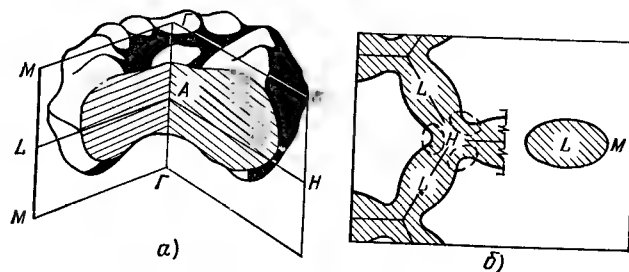


Рис. 30.8. Поверхность Ферми в третьей зоне для Tl [2] (a) и поперечное сечение поверхности Ферми плоскостью AHL [2] в четвертой зоне для Tl (б)

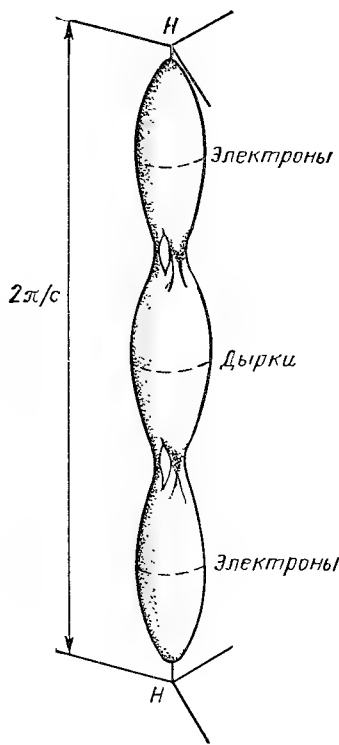


Рис. 30.9. Поверхность Ферми для графита (Модель Макклера) [2]

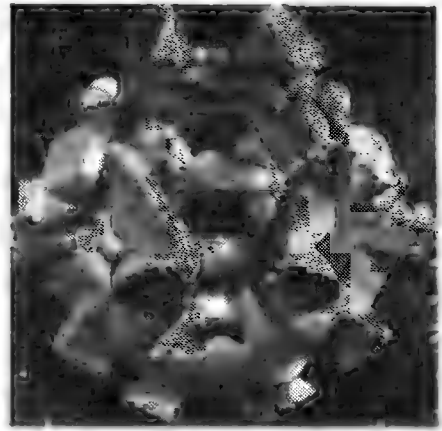


Рис. 30.11. Открытая электронная поверхность Ферми для Rb (третья зона) [1]

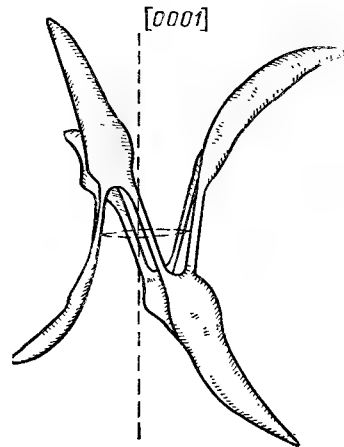


Рис. 30.12. Дырочная поверхность Ферми для As [2]

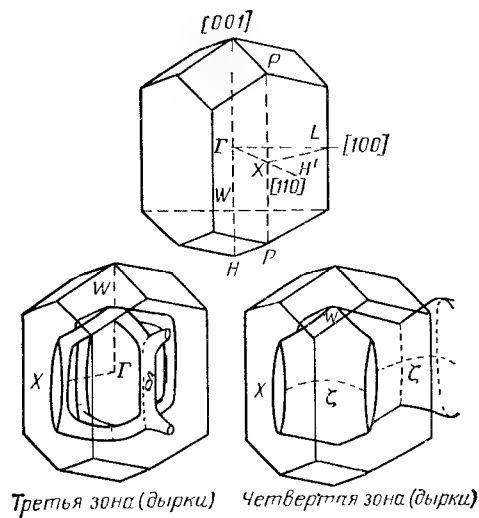


Рис. 30.10. Зона Брюллюэна и дырочные открытые поверхности Ферми для Sn [1]

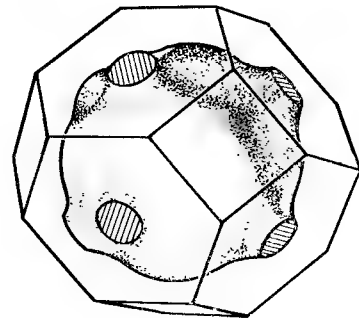


Рис. 30.13. Поверхность Ферми для Cu, Au и Ag [6]

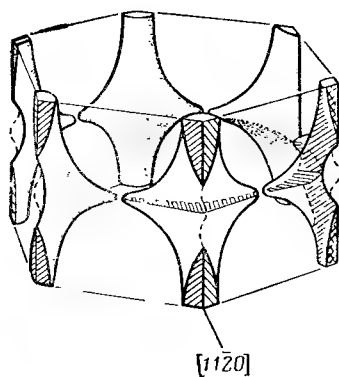


Рис. 30.14. Открытая поверхность Ферми для Cd [1]

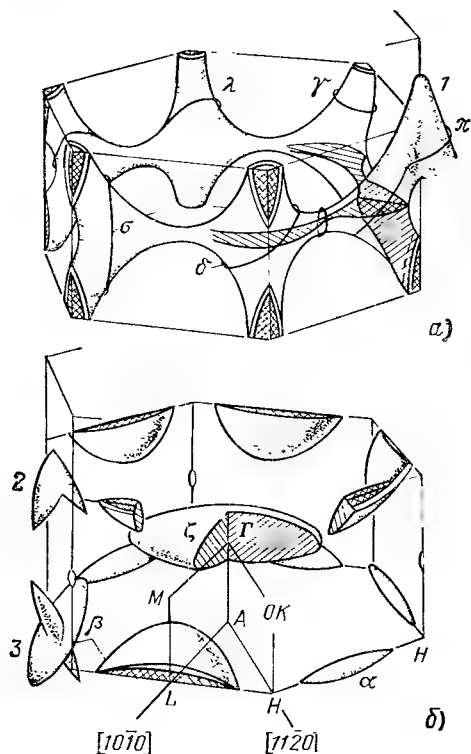


Рис. 30.15. Поверхности Ферми для Zn [1]:  
а — открытая дырочная поверхность (вторая зона) (карманы в первой зоне выделены поперечной штриховкой); б — электронная поверхность в третьей и четвертой зонах (сигары в четвертой зоне поперечно заштрихованы)

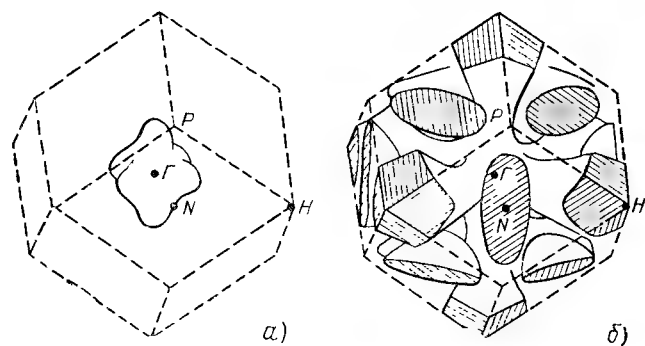
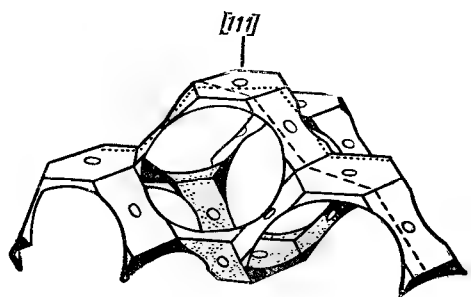


Рис. 30.17. Поверхность Ферми для металлов V группы (V, Nb и Ta) (модель Маттхейса) [2]

а — замкнутая дырочная поверхность в точке Г; б — «игрушечные джунгли» из дырочных трубок и дырочные эллипсоиды в азоте

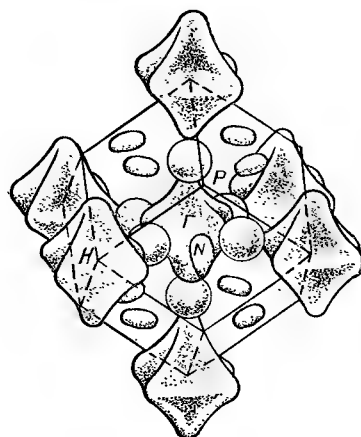


Рис. 30.18. Поверхность Ферми для металлов Mo, W и парамагнитного Cr [2] (модель Ломера)

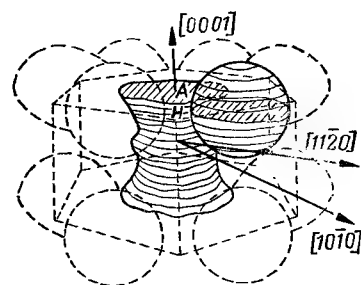


Рис. 30.19. Поверхность ферми Re; дырочная поверхность в седьмой зоне (замкнутая, пунктир) и открытая электронная в восьмой зоне [2]

Рис. 30.16. Открытая многосвязная дырочная поверхность Ферми для Hg в первой зоне [1]

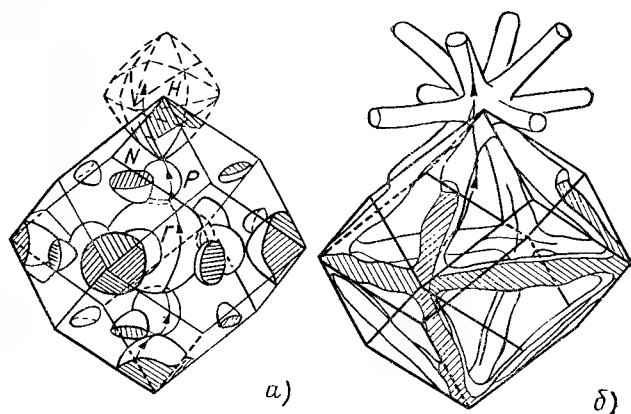


Рис. 30.20. Поверхность Ферми для Co (теоретическая модель) [2];

*a* — дырочная поверхность со спином «вниз»; *b* — дырочная поверхность со спином «вверх»

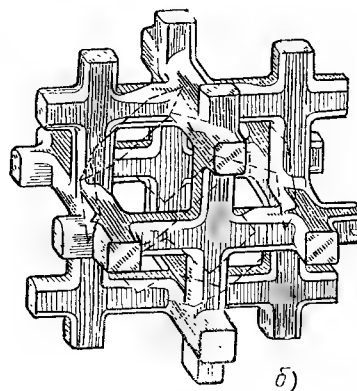
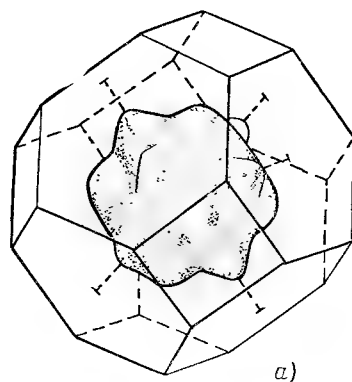


Рис. 30.22. Поверхность Ферми для Pd [2];

*a* — электронная поверхность в  $\Gamma$ ; *b* — многосвязанные дырочные трубки

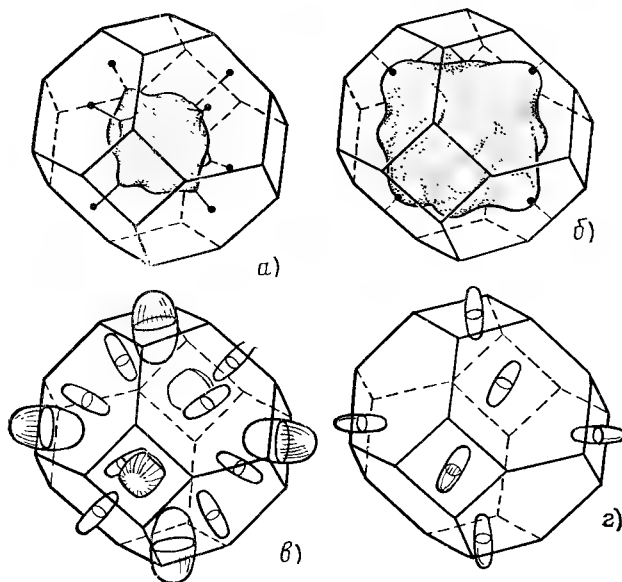


Рис. 30.21. Модель поверхности Ферми для Rh [2];

*a* и *b* — электронные поверхности; *v* и *z* — дырочные карманы

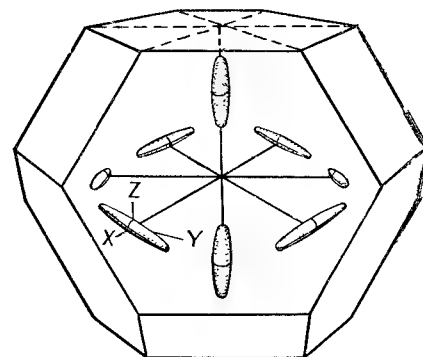


Рис. 30.23. Поверхность Ферми для Bi [3]

### 30.3. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.3, 30.4 и на рис. 30.24—30.53 приведены данные, характеризующие влияние магнитного поля на электрическое сопротивление различных металлов.

Таблица 30.3. Изменение электрического сопротивления чистых металлов в магнитном поле

$\Delta\rho/\rho_{\perp}$ , если  $B \perp I$ ,  $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$ , если  $B \parallel I$ . В таблице представлены значения  $\Delta\rho/\rho_{\perp}$ , кроме специально отмеченных случаев

| Материал, чистота                   | RRR                | T, К    | B, Тл          | $\Delta\rho/\rho$         |                                                            | Литература |
|-------------------------------------|--------------------|---------|----------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|------------|
|                                     |                    |         |                | $\Delta\rho/\rho_{\perp}$ | $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$                              |            |
| Алюминий (99,999 %)                 | 15 000             | 19,6    | 4,0            | 5,0                       | 2,2                                                        | [8]        |
|                                     | 15 000             | 4,0     | 4,0            | 2,4                       | 1,5                                                        | [8]        |
|                                     | 28 200             | 19,6    | 2,0            | 3,1                       | —                                                          | [8]        |
|                                     | 4000               | 4,2—70  | 3,8            | См. рис. 30.25            |                                                            | [9]        |
| Барий                               | 140                | 20,4    | 3,32           | 0,41                      | —                                                          | [10]       |
|                                     | 140                | 14,0    | 3,32           | 3,08                      | —                                                          | [10]       |
| Бериллий поликристаллический        | 30                 | 291     | 30,4           | 0,66                      | —                                                          | [11]       |
|                                     | 30                 | 78      | 30,4           | 2,28                      | —                                                          | [11]       |
| Бериллий монокристаллический        | 40—90              | 4,2     | 3—7,0          | См. рис. 30.26            |                                                            | [12]       |
| Висмут поликристаллический          | —                  | 291     | 30,0           | 37                        | —                                                          | [11]       |
|                                     | —                  | 80      | 30,0           | 1360                      | —                                                          | [11]       |
| Висмут монокристаллический          | —                  | 14; 4,2 | —              | См. рис. 30.27            |                                                            | [13]       |
| Вольфрам                            | —                  | 78      | 30,0           | 0,938                     | —                                                          | [11]       |
| Вольфрам монокристаллический        | 13 500             | 4,2     | —              | См. рис. 30.28            |                                                            | [14]       |
| Галлий поликристаллический 99,7 %   | —                  | 195     | 30,0           | 0,173                     | —                                                          | [11]       |
| Галлий монокристаллический 99,999 % | 25·10 <sup>3</sup> | 4,2     | 2,0            | 24·10 <sup>4</sup>        | $\begin{cases} I \parallel a \\ B \parallel c \end{cases}$ | [15]       |
|                                     |                    |         |                | 6·10 <sup>4</sup>         | $\begin{cases} I \parallel a \\ B \parallel b \end{cases}$ | [15]       |
|                                     |                    |         |                |                           | $B \parallel c$                                            | [15]       |
| Графит монокристаллический 99,995 % | —                  | 1,2     | 16,0           | 14·10 <sup>3</sup>        | —                                                          | [16]       |
|                                     | —                  | 4,2     | 10,0           | 9,5·10 <sup>3</sup>       | —                                                          | [16]       |
|                                     | —                  | 4,2     | 2,0            | 1,5·10 <sup>3</sup>       | —                                                          | [16]       |
| Европий монокристаллический 99,9 %  | —                  | 4,2     | 2,0            | 0,16                      | —                                                          | [17]       |
|                                     | —                  | 4,2     | 4,0            | 0,33                      | —                                                          | [17]       |
|                                     | —                  | 4,2     | 8,0            | 0,58                      | —                                                          | [17]       |
| Золото поликристаллическое 99,999 % | —                  | 79      | 4,0            | 0,018                     | —                                                          | [18]       |
| Золото монокристаллическое 99,999 % | 1600               | 4,2     | 3,0            | См. рис. 30.29            |                                                            | [19]       |
| Индий поликристаллический           | —                  | 165     | 30,0           | 0,03                      | —                                                          | [11]       |
|                                     | —                  | 80      | 30,0           | 0,14                      | —                                                          | [11]       |
| Индий монокристаллический           | 12 000             | 4,2     | 3,5            | См. рис. 30.30            |                                                            | [20]       |
| Кадмий поликристаллический          | —                  | 291     | 30,0           | 0,08                      | —                                                          | [11]       |
|                                     | —                  | 78      | 30,0           | 0,927                     | —                                                          | [11]       |
|                                     |                    |         |                | $\Delta\rho/\rho_{\perp}$ | $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$                              |            |
| То же                               | 200                | 4,2     | 1,6            | 26                        | 0,05                                                       | [21]       |
| Кадмий монокристаллический          | 1000               | 4,2     | 1,6            | 100                       | 10                                                         | [21]       |
| Калий монокристаллический 99,95 %   | 3400               | 4,2     | 5,5            | 0,38                      | при $B \parallel [100]$                                    | [22]       |
|                                     | 3400               | 4,2     | 5,5            | 0,22                      | при $B \parallel [110]$                                    | [22]       |
| Литий                               | 985                | 4,2     | 0,829          | 0,978                     | —                                                          | [23]       |
| »                                   | 985                | 77      | 1,43           | 0,155                     | —                                                          | [23]       |
| »                                   | 985                | 4,2     | 1,60           | —                         | 0,975                                                      | [23]       |
| »                                   | 985                | 77      | 1,49           | —                         | 0,07                                                       | [23]       |
|                                     |                    |         | См. рис. 30.31 |                           |                                                            |            |
| Магний поликристаллический          | —                  | 291     | 30,0           | 0,167                     | —                                                          | [11]       |
| То же                               | —                  | 78      | 30,0           | 2,82                      | —                                                          | [11]       |
| Магний монокристаллический          | 230—610            | 4,2     | 2,5            | См. рис. 30.32            |                                                            | [24]       |
| Медь поликристаллическая            | —                  | 78      | 30,0           | 0,429                     | —                                                          | [11]       |
| Медь монокристаллическая            | 480—630            | 4,2—70  | 3,8            | См. рис. 30.25            |                                                            | [9]        |



| Материал, чистота                                                | RRR    | T, К | B, Тл | $\Delta\rho/\rho$                    |                                                                                            | Литера-<br>тура |
|------------------------------------------------------------------|--------|------|-------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Молибден поликристаллический                                     | —      | 195  | 30,0  | 0,095                                |                                                                                            | [11]            |
| То же                                                            | —      | 78   | 30,0  | 0,915                                |                                                                                            | [11]            |
| Молибден монокристаллический                                     | 1000   | 4,2  | 2,5   | См. рис. 30.33                       |                                                                                            | [25]            |
| Натрий поликристаллический                                       | —      | 80   | 30,0  | 0,07                                 |                                                                                            | [11]            |
| То же                                                            | 5000   | 4,2  | 0,9   | 0,399                                |                                                                                            | [26]            |
|                                                                  |        |      |       | $\Delta\rho/\rho$                    | $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$                                                              |                 |
| Неодим 99,9 %                                                    | —      | 1,4  | 0,5   | 0,04                                 | —0,13                                                                                      | [27]            |
| То же                                                            | —      | 4,2  | 0,5   | 0,02                                 | —0,05                                                                                      | [27]            |
| »                                                                | —      | 14,0 | 0,5   | —0,015                               | —0,04                                                                                      | [27]            |
| «                                                                | —      | 20,4 | 0,5   | 0,010                                | —0,02                                                                                      | [27]            |
| Неодин 99,8 %                                                    | —      | 4,2  | 8,0   | См. рис. 30.34                       |                                                                                            | [17]            |
| Олово поликристаллическое                                        | —      | 291  | 30,0  | 0,02                                 |                                                                                            | [11]            |
| »                                                                | —      | 80   | 30,0  | 0,23                                 |                                                                                            | [11]            |
| « монокристаллическое                                            | 10 000 | 4,2  | 2,0   | См. рис. 30.35                       |                                                                                            | [28]            |
|                                                                  |        |      |       | $\Delta\rho/\rho$                    | $\varphi^*$                                                                                |                 |
| Осмий монокристаллический, ось образца вдоль<br>[11 $\bar{2}$ 0] | —      | 4,2  | 8,0   | 18                                   | 185                                                                                        | [29]            |
| То же                                                            | —      | 4,2  | 3,0   | 16                                   | 170                                                                                        | [29]            |
| »                                                                | —      | 4,2  | 8,0   | 4                                    | 100                                                                                        | [29]            |
| »                                                                | —      | 4,2  | 8,0   | 2,7                                  | 80                                                                                         | [29]            |
| Палладий поликристаллический                                     | —      | 78   | 30,0  | 0,102                                |                                                                                            | [11]            |
| Палладий монокристаллический                                     | 1730   | 4,2  | 1,0   | См. рис. 30.36                       |                                                                                            | [25]            |
| Платина                                                          | —      | 78   | 30,0  | 0,102                                |                                                                                            | [11]            |
| »                                                                | 2400   | 4,2  | 2,0   | См. рис. 30.37                       |                                                                                            | [24]            |
| Празеодим                                                        | —      | 4,2  | 8,0   | $\Delta\rho/\rho_{\parallel} = 0,04$ |                                                                                            | [17]            |
| Рений 99,6 %                                                     | —      | 80   | 3,43  | 0,0196                               |                                                                                            | [30]            |
| Рений монокристаллический                                        | 1600   | 4,2  | 3,43  | См. рис. 30.38                       |                                                                                            | [31]            |
| Родий поликристаллический                                        | —      | 20,4 | 3,6   | 1,546                                |                                                                                            | [32]            |
| То же                                                            | —      | 4,2  | 3,7   | 1,867                                |                                                                                            | [32]            |
|                                                                  |        |      |       | $\Delta\rho/\rho_{\perp}$            | $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$                                                              |                 |
| Рубидий                                                          | 300    | 4,2  | 2,55  | 0,36                                 | 0,117                                                                                      | [33]            |
| Рутений монокристаллический                                      | 100    | 4,2  | 4,0   | 0,87                                 | при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1000] \\ \mathbf{B} \parallel [1120] \end{cases}$ | [34]            |
| То же                                                            | 100    | 4,2  | 4,0   | 0,75                                 | при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1000] \\ \mathbf{B} \parallel [1010] \end{cases}$ | [34]            |
| »                                                                | 100    | 4,2  | 4,0   | 0,59                                 | при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1120] \\ \mathbf{B} \parallel [1110] \end{cases}$ | [34]            |
| »                                                                | 100    | 4,2  | 4,0   | 0,53                                 | при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1120] \\ \mathbf{B} \parallel [1000] \end{cases}$ | [34]            |
| Самарий 99,9 %                                                   | —      | 4,2  | 0,5   | —2                                   |                                                                                            | [17]            |
| То же                                                            | —      | 4,2  | 4,0   | 5                                    |                                                                                            | [17]            |
| »                                                                | —      | 4,2  | 6,0   | 12                                   |                                                                                            | [17]            |
| »                                                                | —      | 4,2  | 8,0   | 17                                   |                                                                                            | [17]            |
| Свинец поликристаллический 99,999 %                              | —      | 291  | 30,0  | <0,01                                |                                                                                            | [18]            |
| То же                                                            | —      | 80   | 30,0  | 0,05                                 |                                                                                            | [18]            |
| »                                                                | 17 000 | 4,2  | 2,28  | 417                                  |                                                                                            | [35]            |
| »                                                                | 17 000 | 1,86 | 2,28  | 4810                                 |                                                                                            | [35]            |
| Свинец монокристаллический                                       | 10 000 | 4,2  | 2,4   | См. рис. 30.39                       |                                                                                            | [28]            |
| Серебро поликристаллическое                                      | —      | 78   | 30,0  | 0,376                                |                                                                                            | [11]            |
| То же                                                            | 1000   | 4,2  | 2,4   | См. рис. 30.40                       |                                                                                            | [36]            |
| Сурьма поликристаллическая                                       | —      | 291  | 30,0  | 3,5                                  |                                                                                            | [11]            |
| То же                                                            | —      | 80   | 30,0  | 40,0                                 |                                                                                            | [11]            |

| Материал, чистота                 | RRR     | T, К | B, Тл | $\Delta\rho/\rho$ | Литература |
|-----------------------------------|---------|------|-------|-------------------|------------|
| Таллий поликристаллический        | —       | 80   | 30,0  | 0,159             | [11]       |
| То же                             | 100 000 | 4,2  | 13,0  | См. рис. 30.41    | [37]       |
| Тантал поликристаллический        | —       | 291  | 30,0  | 0,001             | [11]       |
| То же                             | —       | 80   | 30,0  | 0,01              | [11]       |
| Хром поликристаллический          | —       | 291  | 30,0  | 0,03              | [11]       |
| То же                             | —       | 78   | 30,0  | 4,36              | [11]       |
| Цезий поликристаллический         | —       | 20,4 | 4,0   | 0,03              | [38]       |
| Цинк поликристаллический          | —       | 291  | 30,0  | 0,06              | [11]       |
|                                   | —       | 78   | 30,0  | 0,927             | [11]       |
| Цинк монокристаллический 99,999 % | 20 000  | 4,2  | 1,8   | См. рис. 30.42    | [39]       |
| Цирконий поликристаллический      | —       | 195  | 30,0  | 0,01              | [11]       |
| То же                             | —       | 80   | 30,0  | 0,05              |            |

\*  $\varphi$  — угол между направлением B и осью  $[11\bar{2}0]$ .

Таблица 30.4. Изменение электросопротивления ферромагнитных металлов в магнитном поле

| Материал, чистота                    | RRR | T, К       | $\rho_0 H$ , Тл | $\Delta\rho/\rho$                                                                                          | Литература |
|--------------------------------------|-----|------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Гадолиний поликристаллический 99,9 % | —   | 4,2—350    | 1,6             | См. рис. 30.43                                                                                             | [40]       |
| Гадолиний монокристаллический        | —   | 205        | 1               | 0,015 при $\begin{cases} B \parallel c \\ I \parallel b \end{cases}$                                       | [40]       |
| То же                                | —   | 205        | 1               | —0,01 при $\begin{cases} B \parallel b \\ I \parallel b \end{cases}$                                       | [40]       |
| Гольмий поликристаллический 99,9 %   | 16  | 4—130      | 2,0             | См. рис. 30.44                                                                                             | [41]       |
| Диспрозий поликристаллический 99,5 % | —   | 93         | 0,8             | См. рис. 30.45                                                                                             | [42]       |
|                                      | —   | 60—180     | 1,5             | —0,02 $I \parallel b$ , $B \parallel a$                                                                    | [43]       |
|                                      |     |            |                 | См. рис. 30.46                                                                                             | [43]       |
|                                      |     |            |                 | $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$   $\Delta\rho/\rho_{\perp}$                                                  |            |
| Железо монокристаллическое, вискер   | 260 | 300        | 0,1             | $9 \cdot 10^{-4}$   $-2 \cdot 10^{-4} \begin{cases} I \parallel [100] \\ B \parallel [100] \end{cases}$    | [44]       |
| То же                                | 260 | 300        | 0,1             | $0,36 \cdot 10^{-2}$   $-3 \cdot 10^{-4} \begin{cases} I \parallel [111] \\ B \parallel [111] \end{cases}$ | [44]       |
|                                      |     |            |                 | См. рис. 30.47, 30.48                                                                                      |            |
| Кобальт монокристаллический, вискер  | 460 | 4,2        | 15              | См. рис. 30.49                                                                                             | [45]       |
| Кобальт поликристаллический 99,25 %  | —   | 200—600 °C | 0,2             | См. рис. 30.50                                                                                             | [46]       |
|                                      | —   | 300        | —               | $18 \cdot 10^{-4}$                                                                                         | [47]       |
|                                      |     |            |                 | $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$   $\Delta\rho/\rho_{\perp}$                                                  |            |
| Никель                               | —   | 300        | 1,6             | $15 \cdot 10^{-3}$   $-15 \cdot 10^{-3}$                                                                   | [47]       |
| Никель поликристаллический           | —   | 300        | 0—1,8           | См. рис. 30.51                                                                                             | [47]       |
| Никель монокристаллический           | —   | 300—660    | 1,0             | См. рис. 30.52                                                                                             | [48]       |
|                                      |     |            |                 | $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$   $\Delta\rho/\rho_{\perp}$                                                  |            |
| Тербий поликристаллический 99,5 %    | —   | 220        | 1,5             | —0,02   —0,018                                                                                             | [49]       |
| То же                                | —   | 80—240     | 1,4             | См. рис. 30.53                                                                                             | [49]       |

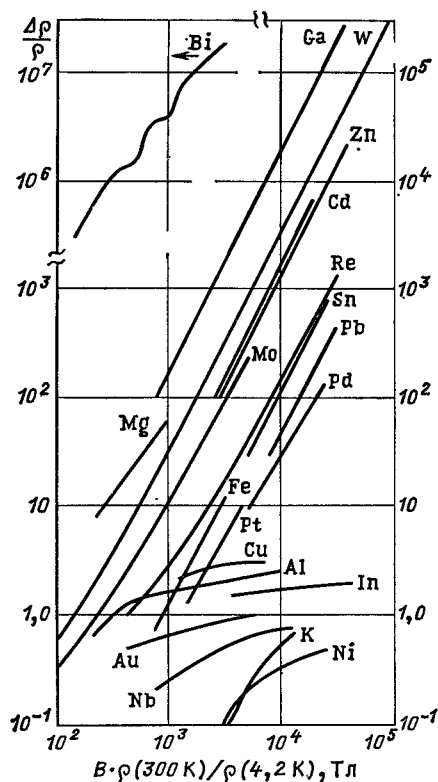


Рис. 30.24. Приведенная диаграмма Колера: зависимость  $\Delta\rho/\rho$  от  $B \cdot \rho(300 \text{ K})/\rho(4,2 \text{ K})$  для ряда металлов [5]

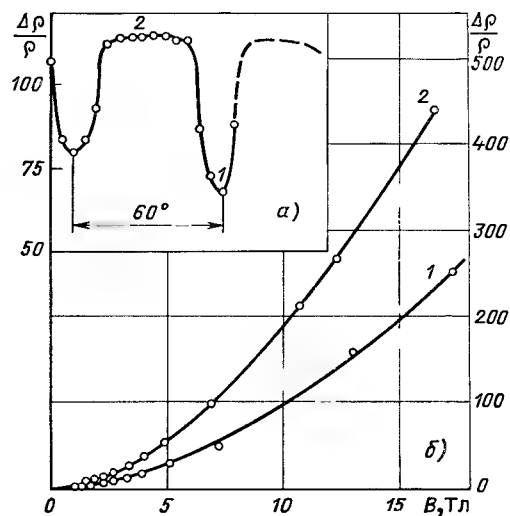


Рис. 30.26. Анизотропия  $\Delta\rho/\rho$  для гексагонального образца Be [12] (а) ( $RRR=88$ ;  $T=4,2 \text{ K}$ ;  $B=7,0 \text{ Тл}$ ;  $\Phi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Be от магнитной индукции (б) в направлениях минимума (1), максимума (2) угловой диаграммы (а) (см. п. 3, с. 738)

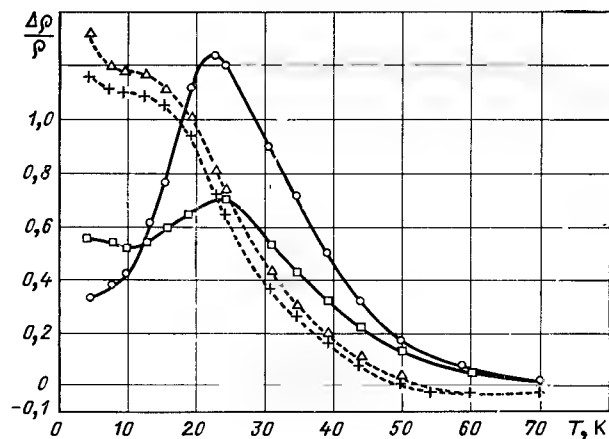


Рис. 30.25. Температурная зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для поликристаллических образцов Al и Cu в магнитном поле  $B=3,8 \text{ Тл}$  [9]:  
для Al:  $\circ$  —  $RRR=4000$ ;  $\square$  —  $RRR=1875$ ; для Cu:  $\triangle$  —  $RRR=480$ ;  $+$  —  $RRR=480$

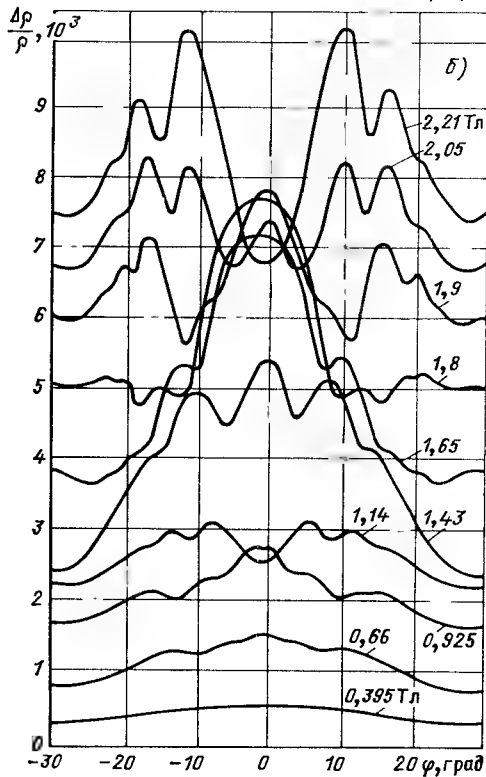
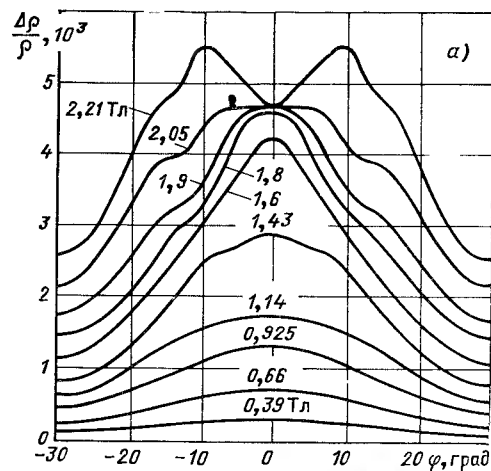


Рис. 30.27. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Bi от ориентации магнитного поля относительно бинарной оси при температуре 14 К (а) и 4,22 К (б) [13] (главная ось параллельна направлению тока)

Рис. 30.30. Анизотропия  $\Delta\rho/\rho$  для монокристаллов In (а, [20]) ( $RRR=12\,400$ ;  $T=4,2$  К;  $B=2,46$  Тл;  $\varphi$  — угол между магнитным полем и направлением в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец) и зависимости  $\Delta\rho/\rho$  для In от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы а (см. п. 1, с. 738)

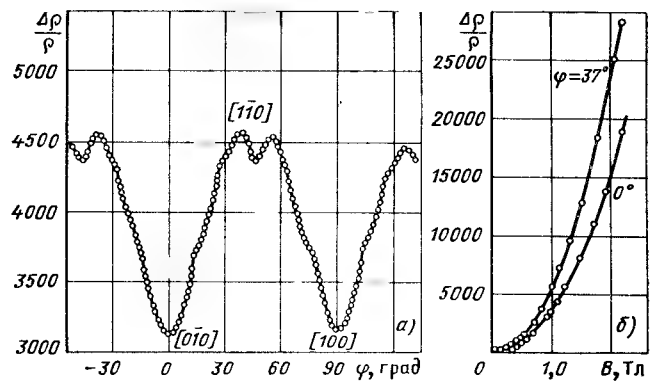


Рис. 30.28. Анизотропия  $\Delta\rho/\rho$  монокристалла W [14] ( $RRR=13\,000$ ;  $T=4,2$  К;  $B=0,9$  Тл; плоскость вращения магнитного поля перпендикулярна к оси [001]; угол  $\varphi$ , определяющий направление поля в этой плоскости, отсчитывается от оси [010]) (а) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для W от магнитной индукции (б) в направлениях, соответствующих максимуму ( $\varphi=37^\circ$ ) и минимуму ( $\varphi=0^\circ$ ) угловой диаграммы на рис. а (см. п. 3, с. 738)

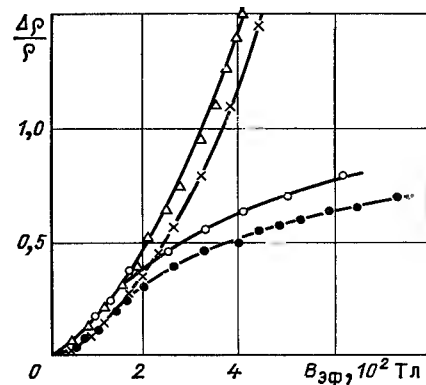
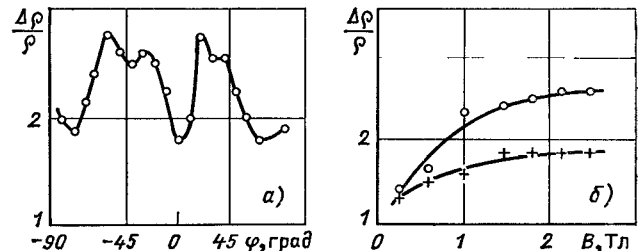


Рис. 30.29. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Au от эффективной магнитной индукции  $B_{эф}=B \cdot \rho$  (300 К)/ $\rho$  (4,2 К) [19] ( $RRR=16\,000$ ):

● — в минимуме ( $\varphi=0^\circ$ ); × — в максимуме ( $\varphi=-75^\circ$ ) угловой диаграммы при  $T=4,2$  К; ○ — в минимуме ( $\varphi=0^\circ$ ) и △ — в максимуме ( $\varphi=-75^\circ$ ) при  $T=20,4$  К;  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец (диаграмма вращения подобна диаграмме вращения Ag, см. рис. 30.40) (см. п. 2, с. 738)



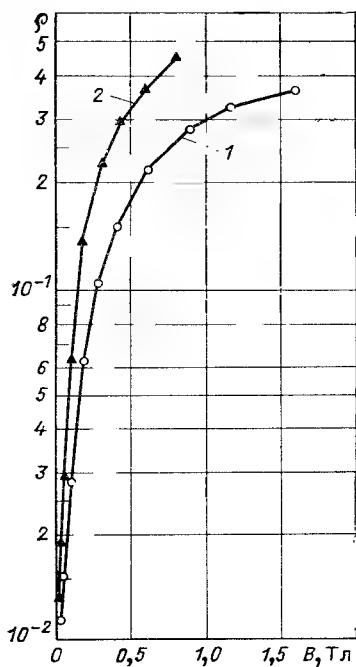


Рис. 30.31. Зависимость электросопротивления  $\rho$  поликристаллического образца Li от магнитной индукции при  $T=4,2$  К [23]:

1 —  $B$  параллельна электрическому току через образец; 2 —  $B$  перпендикулярна электрическому току через образец

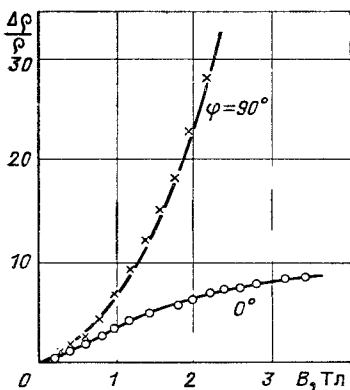


Рис. 30.32. Зависимости  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Mg от магнитной индукции для направлений максимума ( $\varphi=90^\circ$ ) и минимума ( $\varphi=0^\circ$ ) угловой диаграммы (при  $T=4,2$  К) [24];  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ось образца составляет  $65^\circ$  с осью [0001] (см. п. 4, с. 738)

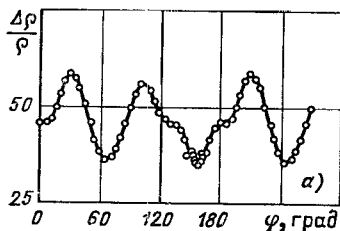


Рис. 30.33. Анизотропия  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Mo (a) [25] ( $RRR=1000$ ;  $T=4,2$  К;  $B=2,3$  Тл;  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец. Ориентация кристалла  $\theta=34^\circ$ ,  $\xi=3^\circ$ ;  $\theta$  и  $\xi$  — полярный и азимутальные углы осей образца относительно главных осей кристалла) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Mo от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы a (см. п. 3, с. 733)

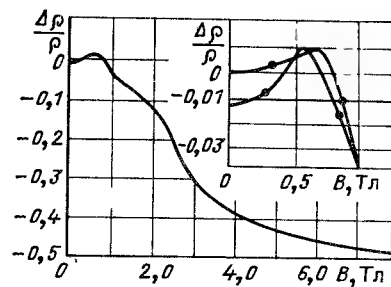
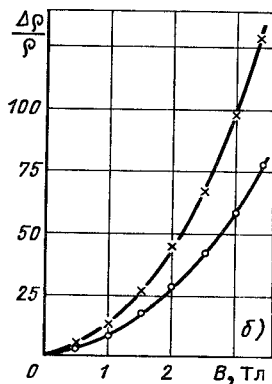


Рис. 30.34. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Nd от магнитной индукции при  $T=4,2$  К [17]

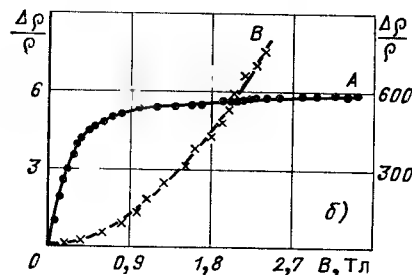
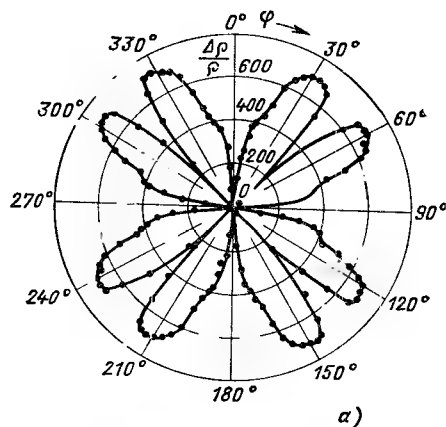


Рис. 30.35. Полярная диаграмма  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Sn (a) [28] ( $T=4,2$  К;  $B=2,3$  Тл;  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец,  $I \perp B$ ,  $I \parallel [001]$ ) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Sn от магнитной индукции (б) в направлениях минимума ( $\varphi=0^\circ$ ) и максимума ( $\varphi=30^\circ$ ) полярной диаграммы a (см. п. 4, с. 738)

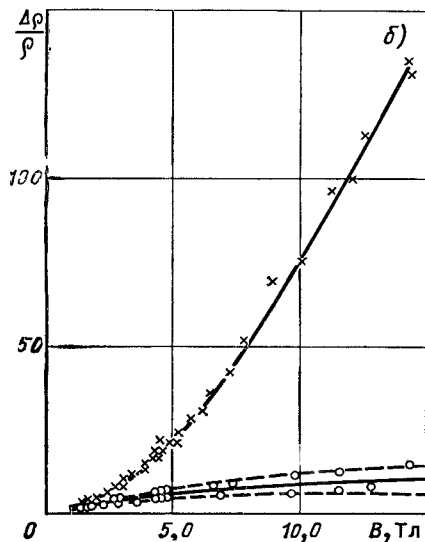
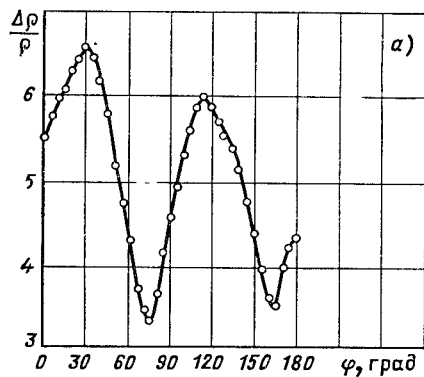


Рис. 30.36. Анизотропия  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Pd [25] (а) ( $T=4,2$  К;  $B=2,3$  Тл;  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ориентация кристалла  $\theta=6^\circ$ ,  $\xi=27^\circ$ ;  $\theta$  и  $\xi$  — полярный и азимутальный углы осей образца относительно главных осей кристалла) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы а (см. п. 2, с. 738)

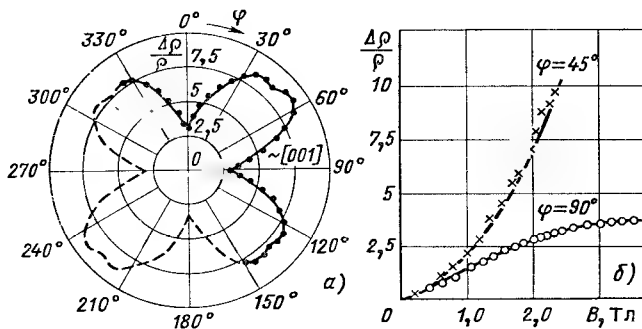


Рис. 30.37. Полярная диаграмма  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Pt [24] ( $RRR=1900$ ;  $B=2,35$  Тл;  $T=4,2$  К;  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через кристалл) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Pt от магнитной индукции (б) в направлениях минимума и максимума полярной диаграммы а (см. п. 4, с. 738)

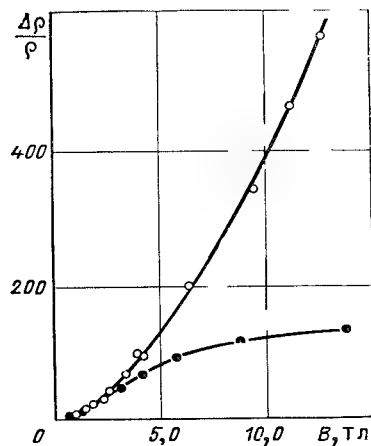


Рис. 30.38. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Re от магнитной индукции ( $T=4,2$  К) в направлениях максимума и минимума угловой диаграммы [31] (см. п. 4, с. 738)

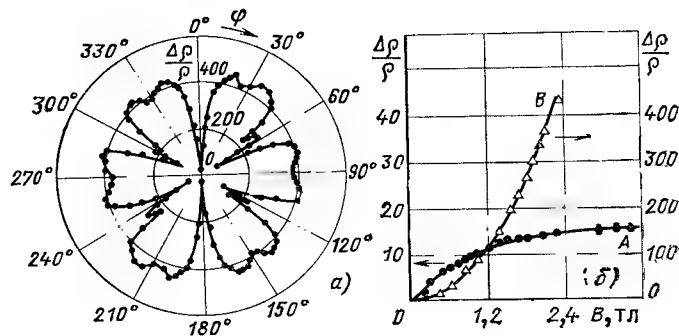


Рис. 30.39. Полярная диаграмма для монокристалла Pb (а) [28] ( $RRR=10\,000$ ;  $T=4,2$  К;  $B=2,23$  Тл;  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ось кристалла параллельна оси [111]) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Pb от магнитной индукции (б) в направлениях минимума ( $\varphi=0^\circ$ ) и максимума ( $\varphi=30^\circ$ ) полярной диаграммы а (см. п. 4, с. 738)

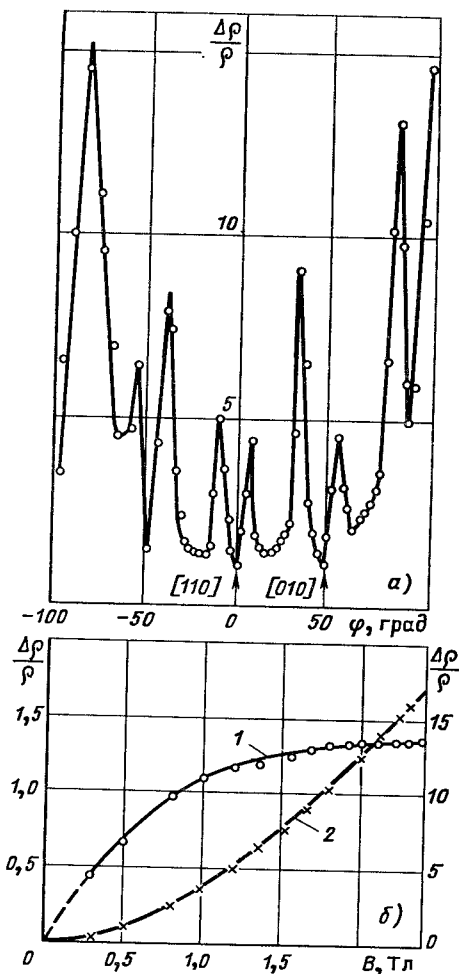


Рис. 30.40. Анизотропия  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Ag [36] ( $RRR=1000$ ;  $T=4,2$  К;  $B=2,35$  Тл;  $\varphi$  — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец, ось образца направлена по [001] с точностью  $\pm 5^\circ$ ) и зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Ag от магнитной индукции (б) в направлениях минимума ( $\varphi=0^\circ$ ) и максимума ( $\varphi=80^\circ$ ) угловой диаграммы а: 1 — отсчет по левой шкале ординат; 2 — по правой (см. п. 2, с. 738)

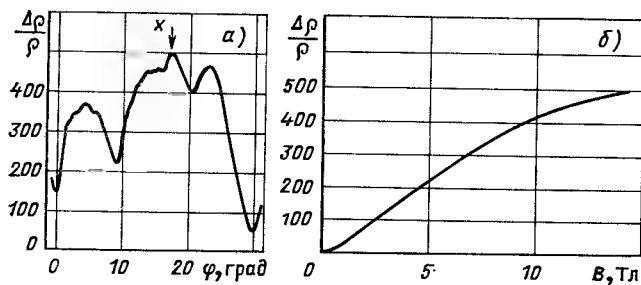


Рис. 30.41. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Tl от угла между направлением магнитного поля в базисной плоскости и осью  $[10\bar{1}0]$  кристалла (а) ( $T=4,2$  К;  $B=13,4$  Тл [37]) и от магнитной индукции (б) при  $T=4,2$  К в направлении  $x$  на рис. а (см. п. 4, с. 6)

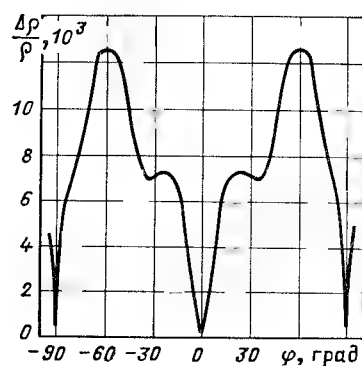


Рис. 30.42. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для монокристалла Zn от угла вращения магнитного поля [39] ( $RRR=20\,000$ ;  $T=4,2$  К;  $B=1,8$  Тл;  $I \parallel [11\bar{2}0]$ ) поперечное вращение  $B$  в плоскости  $(11\bar{2}0)$ ,  $B \parallel [10\bar{1}0]$  при  $\theta=0^\circ$  (см. п. 4, с. 738)

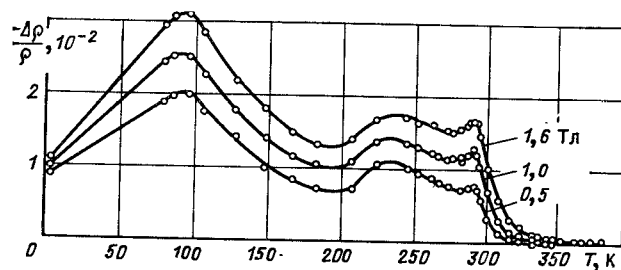


Рис. 30.43. Температурная зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Gd [40] при различных значениях  $\mu_0 H$

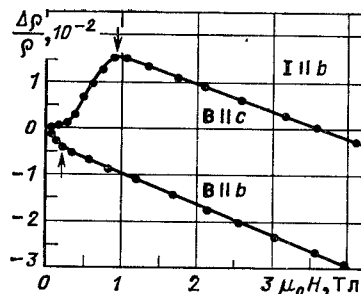


Рис. 30.44. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Gd от  $\mu_0 H$  при  $T=205$  К [41]

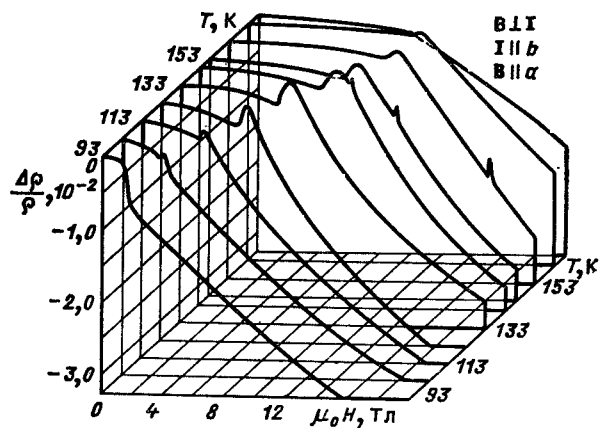
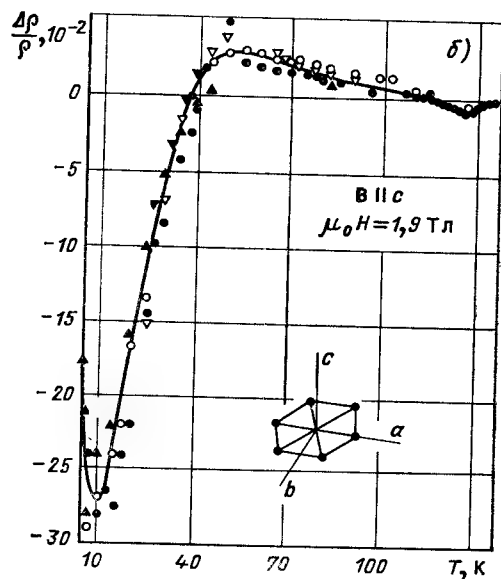
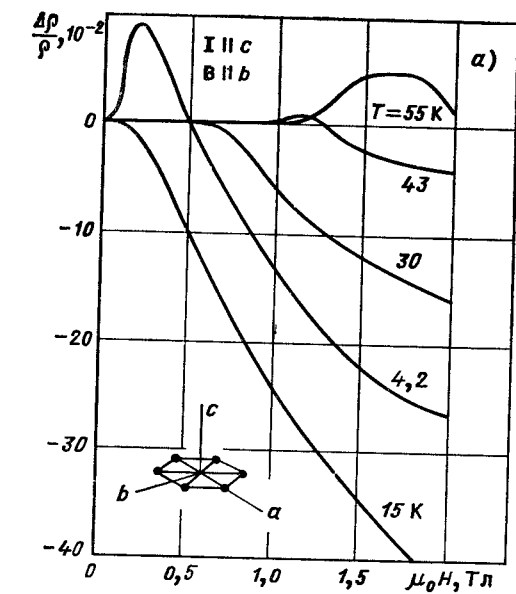


Рис. 30.46. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Dy от  $\mu_0 H$  при различной температуре [43]

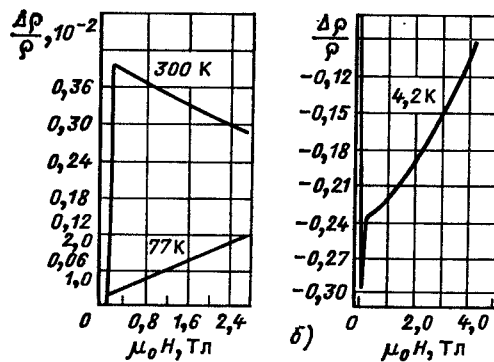
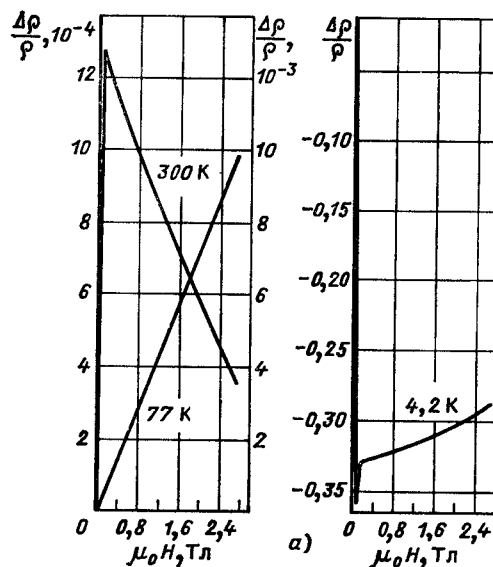


Рис. 30.47. Зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для висконов Fe от  $\mu_0 H$  при температуре 300, 77 и 4,2 K [44]:

a — вдоль оси [100] B || [100] ( $\varnothing$  240 мкм, RRR=200); б — вдоль оси [111] B || [111] ( $\varnothing$  300 мкм, RRR=360)



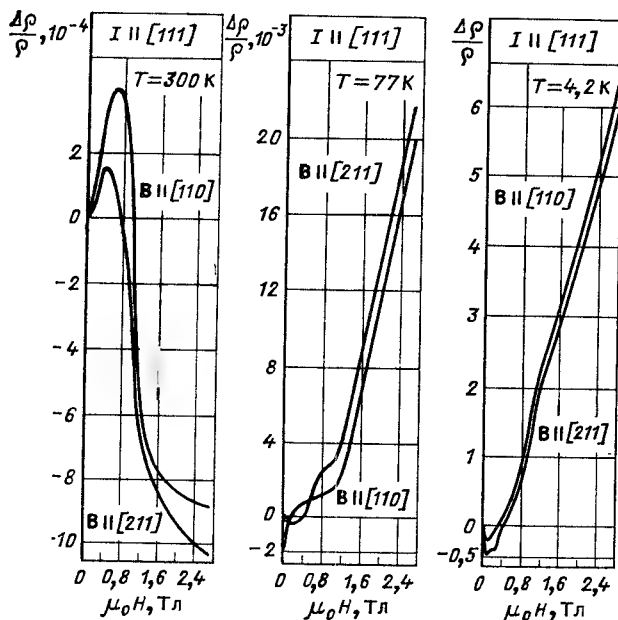
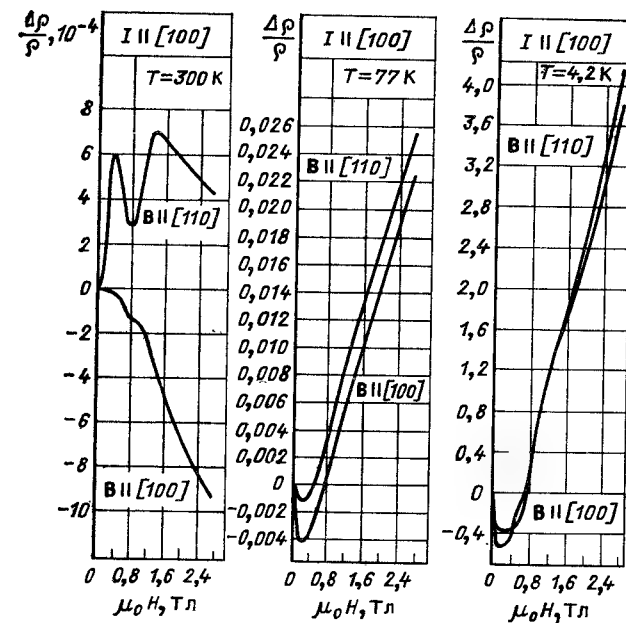


Рис. 30.48. Зависимость  $\Delta\rho/\rho_{\perp}$  для тех же (см. рис. 30.47) високров Fe от  $\mu_0 H$  при температуре 300, 77, 4,2 К и различных ориентациях кристаллов [44]

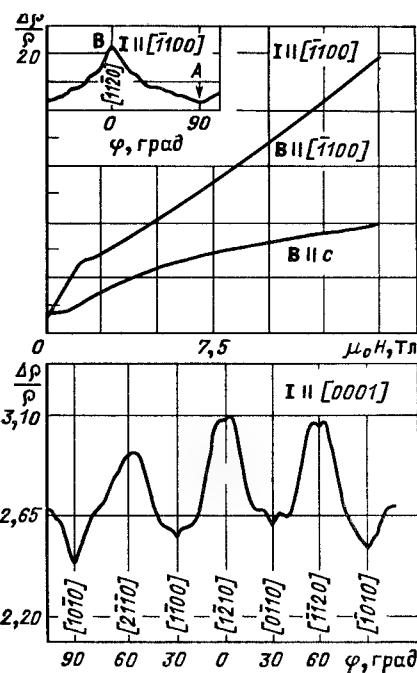


Рис. 30.49. Угловые диаграммы вращения и зависимость от  $\mu_0 H$   $\Delta\rho/\rho_{\perp}$  для монокристаллов Co [45] ( $T=4,2$  К;  $\mu_0 H=15$  Тл;  $RRR=204$ ;  $\varphi$  — угол вращения магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец)

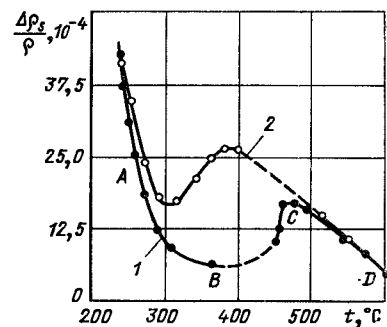


Рис. 30.50. Температурная зависимость насыщения  $\Delta\rho_s/\rho$  для Co при нагреве (1) и охлаждении (2) [46]

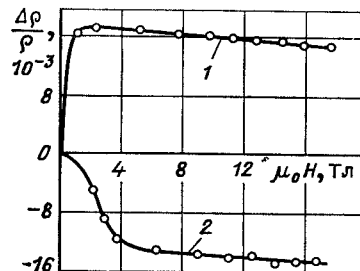


Рис. 30.51. Зависимость  $\Delta\rho/\rho_{\perp}$  (1) и  $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$  (2) для Ni от  $\mu_0 H$  при  $t=20$  °С [47]

### 30.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.5 и 30.6 и на рис. 30.54—30.69 приведены сведения о коэффициенте Холла для различных материалов.

Таблица 30.5. Значения коэффициента Холла для жидких металлов

| Металл    | $R, 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$ | $T, \text{ К}$ | Литература |
|-----------|-----------------------------------------------------|----------------|------------|
| Алюминий  | —3,9                                                | 933—1123       | [101]      |
| Висмут    | —3,0                                                | 558—603        | [102]      |
| Галлий    | —3,9                                                | 303—873        | [102]      |
| Германий  | —3,6                                                | 1233—1283      | [102]      |
| Золото    | —11,8                                               | 1336—1423      | [101]      |
| Индий     | —5,6                                                | 429—973        | [101]      |
| Кадмий    | —7,2                                                | 594—673        | [103]      |
| Лантан    | <0                                                  | —              | [104]      |
| Медь      | —8,25                                               | 1356—1423      | [101]      |
| Натрий    | —25                                                 | 371            | [102]      |
| Неодим    | <0                                                  | —              | [104]      |
| Олово     | —4,4                                                | 523—593        | [103]      |
| Празеодим | <0                                                  | —              | [104]      |
| Ртуть     | —7,6                                                | 303—483        | [103]      |
| Рубидий   | —42                                                 | 308            | [99]       |
| Свинец    | —4,48                                               | 623            | [105]      |
| Серебро   | —11,6                                               | 1273           | [105]      |
| Таллий    | —12,6                                               | 500—1000       | [102]      |
| Церий     | +8,0                                                | 873—1223       | [106]      |
| Цезий     | —74,6÷78,6                                          | 307—372        | [107]      |
| Уран      | +3,8                                                | 273—1473       | [104]      |

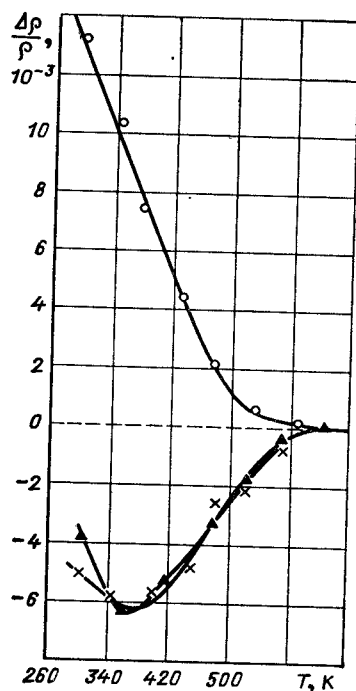


Рис. 30.52. Температурная зависимость насыщения  $\Delta\rho_s/\rho$  и  $-\rho_s/\rho_\perp$  для Ni [48]:

○ —  $\Delta\rho_s/\rho_\parallel$ ; × —  $\Delta\rho_s/\rho_\perp$  ( $\theta=0$ ; ▲ —  $\Delta\rho_s/\rho_\perp$  ( $\theta=60^\circ$ ) ( $\theta$  — угол между плоскостью образца и направлением магнитного поля)

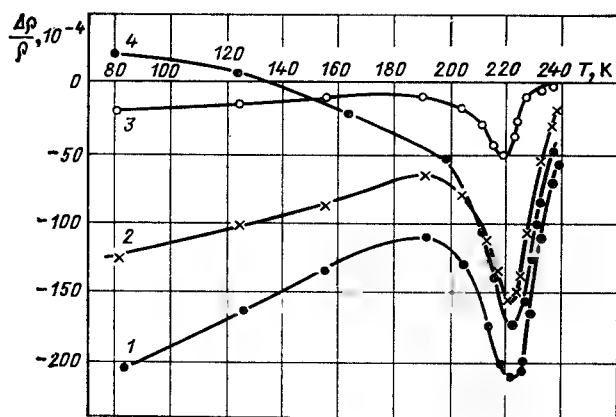


Рис. 30.53. Температурная зависимость  $\Delta\rho/\rho$  для Tb [49]:

1 —  $\Delta\rho/\rho_\parallel$ ,  $\mu_0 H=1,5 \text{ Тл}$ ; 2 —  $\Delta\rho/\rho_\parallel$ ,  $\mu_0 H=0,78 \text{ Тл}$ ; 3 —  $\Delta\rho/\rho_\parallel$ ,  $\mu_0 H=0,13 \text{ Тл}$ ; 4 —  $\Delta\rho/\rho_\perp$ ,  $\mu_0 H=1,5 \text{ Тл}$

Таблица 30.6. Значения коэффициента Холла для металлов

| Металл, чистота                          | $T, K$  | $B, Tл$                  | $R, 10^{-11} м^2/(A \cdot c)$ | Литература |
|------------------------------------------|---------|--------------------------|-------------------------------|------------|
| Алюминий 99,5%, $RRR = 11$               | 83      | 0,54                     | -2,2                          | [50]       |
| То же                                    | 273     | 0,54                     | -3,3                          | [50]       |
| »                                        | 573     | 0,54                     | -3,9                          | [50]       |
| »                                        | 873     | 0,54                     | -4,1                          | [50]       |
| Алюминий 99,9999%, $RRR = 84 \div 2600$  | 2—80    | 0,5                      | См. рис. 30.54                | [51]       |
| Бериллий монокристаллический 99,5%       | 290     | 0,3—2,0                  | $R_{B \parallel c_s} = -77$   | [52]       |
| Бериллий монокристаллический 99,99%      | 290     | 0,3—2,0                  | $R_{B \parallel c_s} = -76,4$ | [53]       |
| То же                                    | 290     | 0,3—2,0                  | $R_{B \perp c_s} = 148$       | [53]       |
| Ванадий 99,6%, $RRR = 11,5$              | 20      | —                        | См. рис. 30.55                | [53]       |
| То же                                    | 300     | —                        | 6,2                           | [54]       |
| Висмут монокристаллический               | —       | —                        | 7,9                           | [54]       |
| Вольфрам 99,9%                           | 870     | 0,54                     | См. рис. 30.56                | [55]       |
| То же                                    | 273     | 0,54                     | 15,6                          | [50]       |
| »                                        | 170     | 0,54                     | 11,1                          | [50]       |
| »                                        | 80      | 0,54                     | 10,6                          | [50]       |
| Гафний 99,9%, $RRR = 27,5$               | 300     | 0,54                     | 12,0                          | [50]       |
| То же                                    | 200     | 1,3                      | 4,2                           | [56]       |
| »                                        | 100     | 1,3                      | 3,0                           | [56]       |
| »                                        | 4,2     | 1,3                      | 1,9                           | [56]       |
| Золото 99,9999%, $RRR = 1957$            | 300     | 1,52                     | -2,6                          | [56]       |
| То же                                    | 4,2—300 | —                        | -7,3                          | [57]       |
| Индий 99,9999%, $RRR = 7100$             | 300     | —                        | См. рис. 30.57                | [57]       |
| То же                                    | 6—280   | 6,3 ( $\omega\tau > 1$ ) | -5,43                         | [58]       |
| Иридий, $\rho(20 K)/\rho(300 K) = 0,21$  | 300     | —                        | 16                            | [59]       |
| То же                                    | 81      | —                        | См. рис. 30.58                | [59]       |
| Иттербий                                 | 300     | —                        | 3,18                          | [60]       |
| То же                                    | 77      | 0,55                     | 3,49                          | [60]       |
| Иттербий $RRR = 17$                      | 20—400  | 0,55                     | 35                            | [61]       |
| Иттрий, $RRR = 10$ , монокристаллический | 300     | 0,20                     | 38                            | [61]       |
| То же                                    | 300     | 1,0                      | См. рис. 30.59                | [62]       |
|                                          | 300     | 1,0                      | $R_{B \perp c_s} = 4,7$       | [63]       |
|                                          |         |                          | $R_{B \parallel c_s} = -17,2$ | [63]       |
| То же, $RRR = 15$                        | 4—300   | —                        | См. рис. 30.60                | [63]       |
| Кадмий поликристаллический               | 90      | 1,0                      | См. рис. 30.60                | [64]       |
| То же                                    | 20      | 1,0                      | 10                            | [65]       |
| »                                        | 4,2     | 1,0                      | 20                            | [65]       |
| Кадмий монокристаллический               | 297     | —                        | -14                           | [65]       |
| То же                                    | 297     | —                        | $R_{B \perp c_s} = 3,9$       | [66]       |
| Калий                                    | 300     | —                        | $R_{B \parallel c_s} = 13,9$  | [66]       |
| То же, $RRR = 1000 \div 8000$            | 4—100   | 0,05—0,95                | -42                           | [67]       |
| Кальций 99%                              | 300     | 0,1                      | См. рис. 30.61                | [68]       |
| Лантан 99,8%                             | 20—300  | 0,56                     | -17,8                         | [69]       |
| Литий, $RRR = 850$                       | 300     | 0,95                     | -8                            | [70]       |
| То же                                    | 4,2     | 0,95                     | -13,8                         | [71]       |
| »                                        | —       | —                        | -14,8                         | [71]       |
| Лютеций, $RRR = 25$                      | 300     | 0,55                     | См. рис. 30.62                | [71]       |
|                                          |         |                          | -5,3                          | [61]       |
| Магний 99,999%                           | 300     | 0,4—2,5                  | См. рис. 30.60                |            |
| То же                                    | 300     | —                        | -8,3                          | [72]       |
| »                                        | 300     | —                        | $R_{B \parallel c_s} = -7,8$  | [72]       |
| Марганец                                 | 297     | 0,6—2,9                  | $R_{B \perp c_s} = -0,8$      | [72]       |
| $\alpha$ -Марганец                       | 4—300   | —                        | 8,44                          | [73]       |
| Медь 99,9999%                            | 300     | 1,5                      | См. рис. 30.63                | [73]       |
| То же                                    | 150     | 1,5                      | -5,3                          | [57]       |
| »                                        | 50      | 1,5                      | -5,4                          | [57]       |
| »                                        | 40      | 1,5                      | -6,3                          | [57]       |
| »                                        | 4       | 1,5                      | -6,8                          | [57]       |
| То же, $RRR = 150$                       | <80     | 0,0085—0,51              | -6,5                          | [57]       |
| Молибден                                 | 873     | 0,54                     | См. рис. 30.64                | [75]       |
| »                                        | 273     | 0,54                     | 17,6                          | [50]       |
| »                                        | 83      | 0,54                     | 18,0                          | [50]       |
| То же, $RRR = 32\ 000$                   | 4—150   | 1,25                     | 17,9                          | [50]       |
|                                          |         |                          | См. рис. 30.65                | [76]       |

| Металл, чистота                         | T, К     | B, Тл       | R, 10 <sup>-11</sup> м <sup>3</sup> /(А · с) | Литература |
|-----------------------------------------|----------|-------------|----------------------------------------------|------------|
| Натрий                                  | 300      | 1,0         | -13,2                                        | [77]       |
| »                                       | 78       | 1,0         | -12,4                                        | [77]       |
| »                                       | 20       | 1,0         | -12,7                                        | [77]       |
| То же, RRR = 1500 ÷ 6700                | 4—100    | 0,525—0,945 | См. рис. 30.66                               | [68]       |
| Неодим 99,98%                           | 293      | 0,56        | 9,71                                         | [70]       |
| То же                                   | —        | —           | См. рис. 30.67                               | [70]       |
| Ниобий, RRR = 13                        | 300      | 3,0         | 8,72                                         | [78]       |
| То же                                   | 77       | 3,0         | 8,50                                         | [78]       |
| »                                       | 4,2      | 3,0         | 9,54                                         | [78]       |
| Олово 99,9%                             | 294      | 0,81        | -0,22                                        | [79]       |
| То же, RRR = 60000                      | 4,2      | 0,69        | R <sub>B  100</sub> = -48                    | [80]       |
| Осмий, RRR = 12                         | 300      | —           | 2,9                                          | [81]       |
| Палладий                                | 300      | —           | -7,5                                         | [82]       |
| »                                       | 115      | —           | -6,2                                         | [82]       |
| »                                       | 4,2      | —           | -7,8                                         | [83]       |
| Платина 99,9%                           | 300      | 0,54        | -2,2                                         | [50]       |
| То же                                   | 170      | 0,54        | -1,8                                         | [50]       |
| »                                       | 80       | 0,54        | -2,0                                         | [50]       |
| α-Плутоний                              | 6—438    | —           | См. рис. 30.63                               | [84]       |
| β-Плутоний                              | {100—438 | —           | {+3                                          | [84]       |
| »                                       | {7       | —           | {-90                                         | [84]       |
| γ-Плутоний                              | {400     | —           | {3                                           | [84]       |
| »                                       | {7       | —           | {37                                          | [84]       |
| Празеодим 99,9%                         | 20—300   | 1,0         | См. рис. 30.67                               | [70]       |
| То же                                   | 300      | —           | 7,1                                          | [70]       |
| Рений, RRR = 38                         | 300      | 1,5         | 22                                           | [85]       |
| То же                                   | 200      | 1,5         | 28                                           | [85]       |
| »                                       | 100      | 1,5         | 32                                           | [85]       |
| Родий 99,9%                             | 300      | 0,49        | 5,02                                         | [86]       |
| Рубидий дистиллят                       | 300      | —           | -50                                          | [87]       |
| То же, RRR = 489—441                    | —        | 0,95        | См. рис. 30.68                               | [71]       |
| Рутений                                 | 300      | 0,49        | +22                                          | [88]       |
| Самарий 99,9%                           | 300      | 0,55        | -2                                           | [61]       |
| То же, RRR = 17,3                       | 17       | 0,55        | 28                                           | [89]       |
| »                                       | 2,4      | 0,55        | 16                                           | [89]       |
| Свинец 99,9%, RRR = 6 · 10 <sup>3</sup> | 293      | —           | 0,98                                         | [90]       |
| То же монокристаллический               | 4,2      | 2,3         | R <sub>B  110</sub> = 43                     | [91]       |
| Серебро 99,9999%, RRR = 918             | 300      | 1,52        | -8,98 (См. рис. 30.57)                       | [57]       |
| Скандий 99,86%                          | 300      | 1,3         | -6,7                                         | [92]       |
| То же                                   | 4,2      | 1,3         | -3,0                                         | [92]       |
| Таллий                                  | 297      | 1,7—1,8     | 2,4                                          | [93]       |
| Тантал                                  | 300      | 0,54        | 10                                           | [94]       |
| Титан 99,97% монокристаллический        | 300      | 0,95        | R <sub>B  c<sub>s</sub></sub> = 7,1          | [95]       |
| То же                                   | 300      | 0,95        | R <sub>B⊥c<sub>s</sub></sub> = -10,8         | [95]       |
| α-Торий, RRR = 18,2                     | 297      | 3,0         | -11,16                                       | [71]       |
| То же                                   | 77       | 3,0         | -10,35                                       | [71]       |
| »                                       | 4,2      | 3,0         | -9,7                                         | [71]       |
| Тулий поликристаллический 99,9%         | 300      | 0,55        | -15                                          | [61]       |
| То же, RRR = 7,4                        | —        | —           | R <sub>0</sub> = -23,5                       | [96]       |
| Хром 99,9%                              | 287      | 1,0—2,9     | +36,3                                        | [97]       |
| То же, RRR = 15                         | 8—40     | 1,0         | См. рис. 30.69                               | [98]       |
| Цезий 99,9%                             | 293      | —           | -73,2                                        | [99]       |
| То же                                   | 200      | —           | -71,5                                        | [99]       |
| Церий 99,8%                             | 293      | 0,56        | +18,1                                        | [70]       |
| Цинк 99,999% монокристаллический        | 297      | 1,86        | R <sub>B  c<sub>s</sub></sub> = 14,4         | [100]      |
| То же                                   | 297      | 1,86        | R <sub>B⊥c<sub>s</sub></sub> = -4,0          | [100]      |
| »                                       | 77       | 1,86        | R <sub>B  c<sub>s</sub></sub> = 18,5         | [100]      |
| »                                       | 77       | 1,86        | R <sub>B⊥c<sub>s</sub></sub> = 2             | [100]      |
| Цирконий, RRR = 27                      | 300      | 0—1,5       | 15,5                                         | [85]       |
| То же                                   | 200      | 0—1,5       | 8,0                                          | [85]       |
| »                                       | 100      | 0—1,5       | 4,5                                          | [85]       |
| Уран, RRR = 12                          | 273      | 3,0         | 3,93                                         | [78]       |
| То же                                   | 77       | 3,0         | 4,75                                         | [78]       |
| »                                       | 4,2      | 3,0         | -0,31                                        | [78]       |

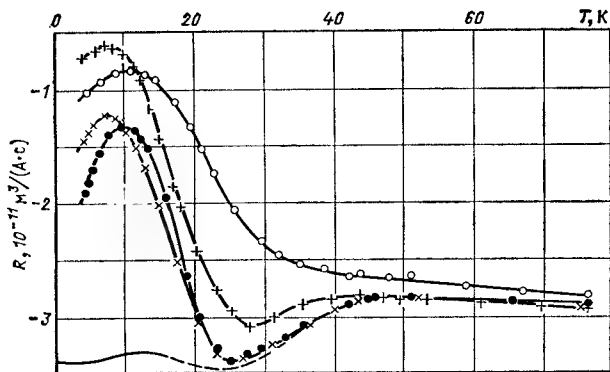


Рис. 30.54. Температурная зависимость коэффициента Холла в слабом магнитном поле ( $\omega\tau < 1$ ) для чистого Al [51]:

● —  $RRR=2380$  и  $6 N$ ; × —  $RRR=2600$  и  $6 N$ ; + —  $RRR=1810$  и  $5 N$ ; ○ —  $RRR=84$  и  $4 N$  ( $6 N$  — чистота образца, соответствующая 99,999%; нижняя кривая — теоретическая)

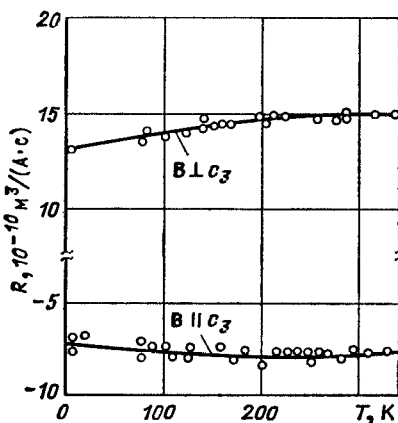


Рис. 30.55. Температурная зависимость коэффициента Холла для гексагонального монокристалла Be [53]

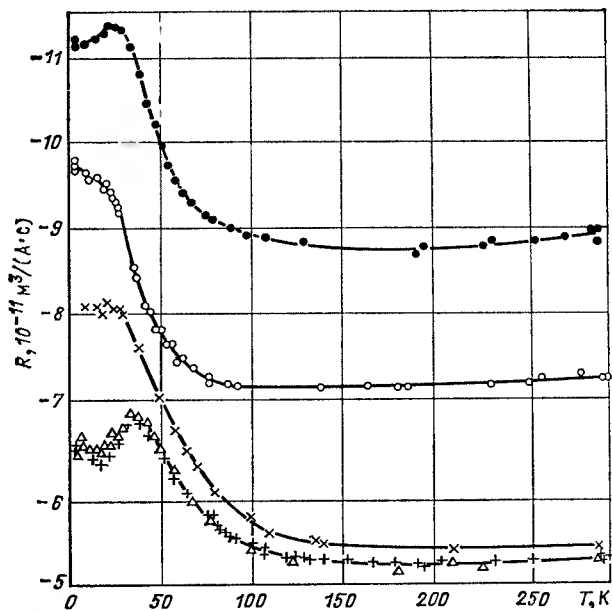
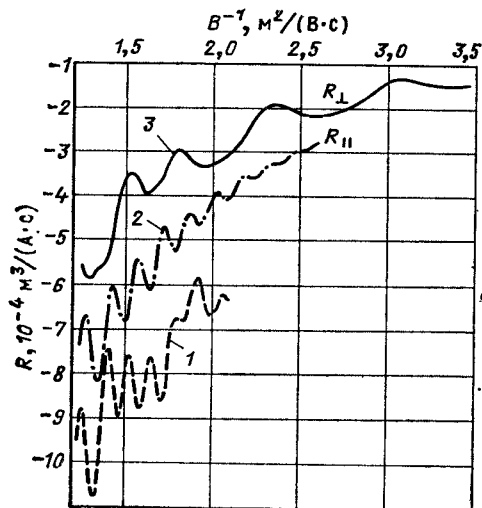


Рис. 30.57. Температурная зависимость коэффициента Холла для чистых образцов (99,9999%) Ag, Au и Cu [57]: ● — Ag, отожженный образец; ○ — Au, неотожженный образец; × — Cu, неотожженный образец; + — Cu, отожженный образец толщиной 0,929 мм, Δ — Cu, отожженный образец толщиной 1,719 мм

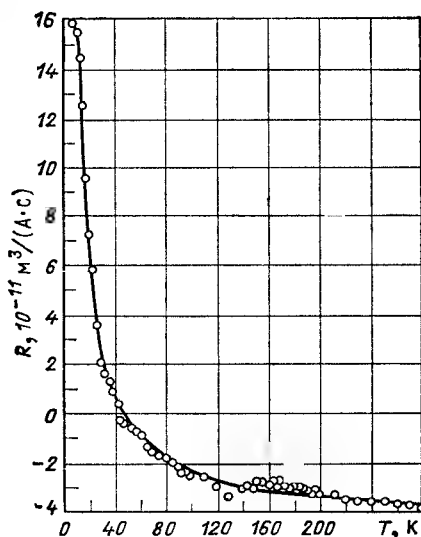


Рис. 30.58. Температурная зависимость коэффициента Холла монокристалла In [59] (магнитное поле  $B=6,3$  Тл ориентировано вдоль оси [101] кристалла)

Рис. 30.56. Полевая зависимость коэффициента Холла монокристалла Bi при  $T=1,4$  К [55]:

1 — угол между направлением магнитного поля и тригональной осью  $25^\circ$ , ток параллелен бинарной оси; 2 — магнитное поле параллельно тригональной оси; 3 — магнитное поле перпендикулярно тригональной оси;  $R_\perp$  —  $B \parallel$  тригональной оси;  $R_\parallel$  —  $B \parallel$  тригональной оси

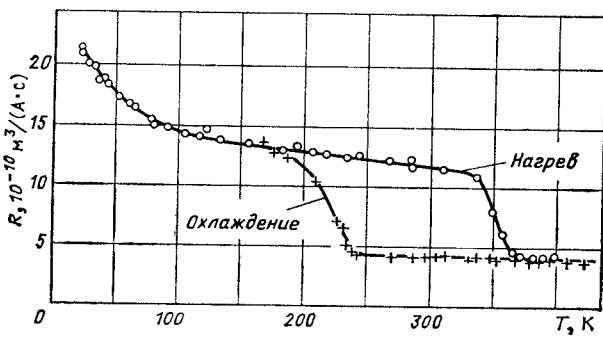


Рис. 30.59. Температурная зависимость коэффициента Холла монокристалла Yb (RRR=17; B=2,0 Тл) [62]

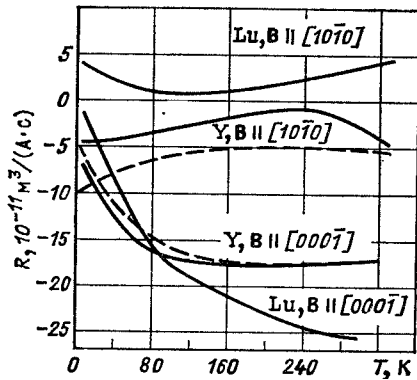


Рис. 30.60. Температурная зависимость коэффициента Холла для Y и Lu (сплошные линии [63], штриховые — [64])

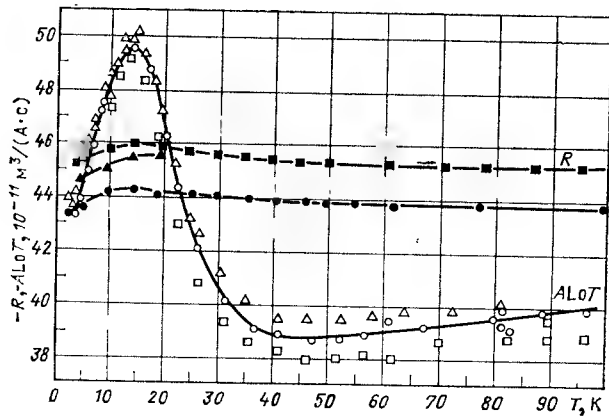


Рис. 30.61. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги-Ледюка ALoT ( $Lo^*$  — число Лоренца;  $Lo = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{K}{e} \right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}^2}$ ; T — температура) для чистых образцов K [68]:

○ — RRR=720; △ — RRR=700; □ — RRR=2000; ● — RRR=2900; ■ — RRR=7900; ▲ — RRR=640; B=1 Тл

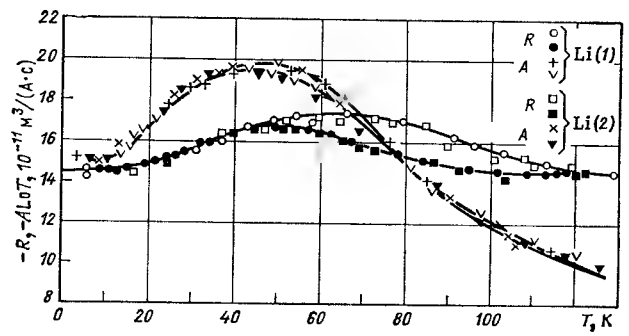


Рис. 30.62. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги-Ледюка ALoT ( $Lo^*$  — число Лоренца, T — температура) для Li [71]

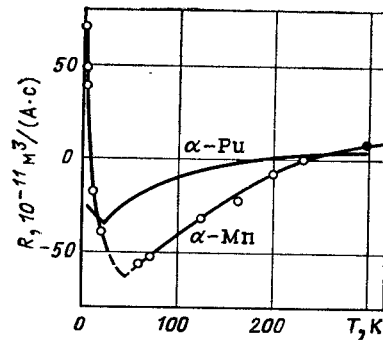


Рис. 30.63. Температурная зависимость коэффициента Холла для поликристаллических образцов α-Mn [74] и α-Pu [84]

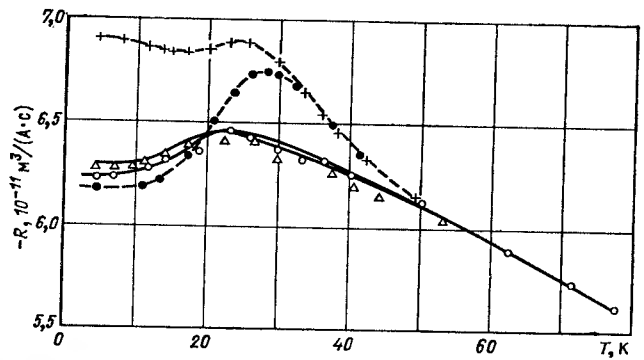


Рис. 30.64. Температурная зависимость коэффициента Холла для Cu [75]:

● △ — образец 1; +, ○ — образец 2; — — — B=0,5145 Тл; — — — B=0,0085 Тл

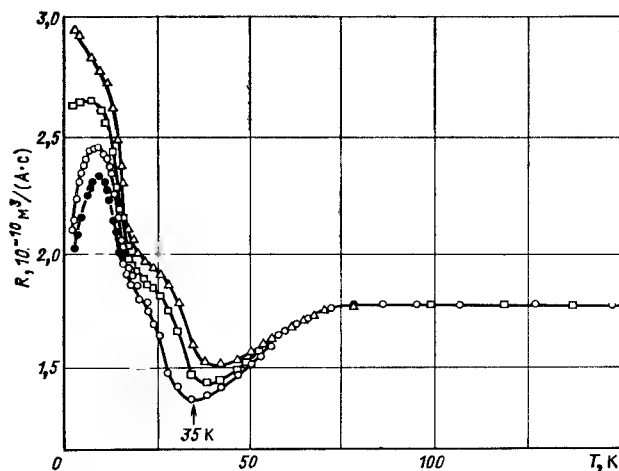


Рис. 30.65. Температурная зависимость коэффициента Холла для монокристалла Мо [76]:  
 $H || <100>$ ; ● —  $B=0,25$  Тл; ○ —  $B=0,45$  Тл; □ —  $B=0,85$  Тл; △ —  $B=1,25$  Тл

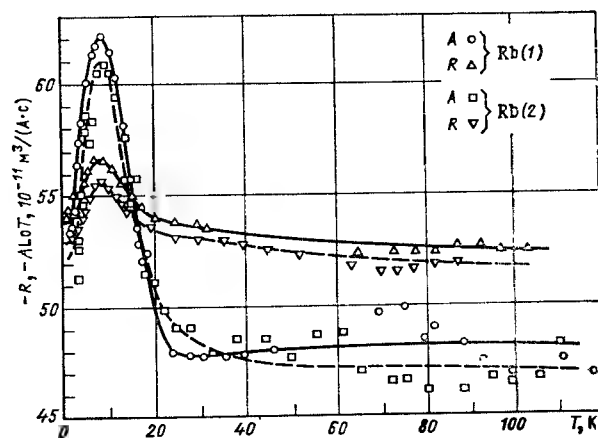


Рис. 30.68. Температурная зависимость коэффициентов Холла  $R$  и Риги—Ледюка  $ALoT$  для Rb [71]

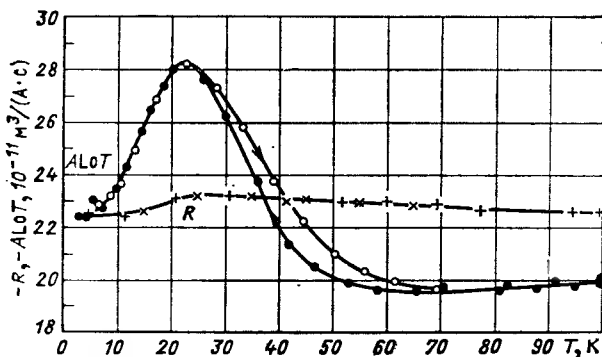


Рис. 30.66. Температурная зависимость коэффициентов Холла  $R$  и Риги—Ледюка  $ALoT$  ( $Lo^*$  — число Лоренца,  $T$  — температура для Na [68]):  
 $R/R_R=1500$ ; ●, + — охлаждение; ○, × — нагрев

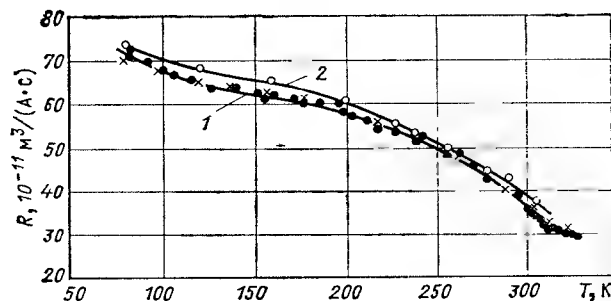


Рис. 30.69. Температурная зависимость коэффициента Холла для Cr [98]:  
 1 — до отжига; 2 — после отжига

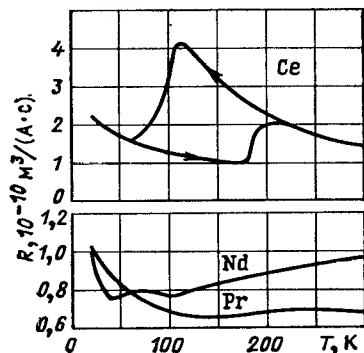


Рис. 30.67. Температурная зависимость коэффициентов Холла для поликристаллических образцов Ce, Nd, Pr [70]

### 30.5. КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.7 и 30.8 и на рис. 30.70—30.76 приведены данные о коэффициенте Холла ферромагнетиков и редкоземельных металлов.

Таблица 30.7. Значения коэффициентов Холла для ферромагнитных металлов

| Металл, чистота               | $T$ , К   | $\rho_0 H$ , Тл | $R_0$ , $10^{-10}$ м <sup>2</sup> /(А·с) | $R_s$ , $10^{-10}$ м <sup>2</sup> /(А·с) | Литература |
|-------------------------------|-----------|-----------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------|
| Железо 99,99%, RRR = 20       | 293       | 0—3,3           | 0,2                                      | 6,8                                      | [108]      |
| То же поликристаллическое     | 4,2—300   | —               | См. рис. 30.70                           |                                          | [109]      |
| Железо, вискры, RRR = 180÷452 | 1—300     | —               | См. рис. 30.70                           |                                          | [110]      |
| То же 99,99%                  | 1—800     | —               | См. рис. 30.71                           |                                          | [111]      |
| Кобальт 99,99%, RRR = 60      | 293       | 0—2,8           | —0,84                                    | 0,14                                     | [109]      |
| То же 99,99%                  | 273—1400  | 0,23            | См. рис. 30.72                           |                                          | [112]      |
| Никель 99,999%, RRR = 480     | 293       | 0—2,9           | —0,56                                    | —5,0                                     | [113]      |
| То же 99,999%                 | $T > T_C$ | 0,85            | —1,08                                    | —41                                      | [114]      |
| То же                         | 70—700    | —               | См. рис. 30.73                           |                                          | [115]      |

Таблица 30.8. Значения коэффициентов Холла для магнитных редкоземельных металлов

| Металл, чистота                                | $T$ , К   | $R_0$ , $10^{-10}$ м <sup>2</sup> /(А·с) | $R_s$ , $10^{-10}$ м <sup>2</sup> /(А·с) | Литература |
|------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------|
| Гадолиний 99,9%, RRR = 51, поликристаллический | $T > T_C$ | —2                                       | —384                                     | [116]      |
| Гадолиний, RRR = 20, монокристаллический       | $T > T_C$ | —                                        | —225*1; —452*2                           |            |
| То же, RRR = 40                                | $T < T_C$ | См. рис. 30.74                           |                                          | [64]       |
| Гольмий 99,9%, RRR = 12, поликристаллический   | $T > T_C$ | —2,2                                     | —2,8                                     | [117]      |
| То же монокристаллический                      | $T > T_C$ | —3,2*1; +0,2*2                           | —13,2*1; +2,2*2                          | [118]      |
| Диспрозий 99,9%, RRR = 10, монокристаллический | $T > T_C$ | —5,7*1; —1,0*2                           | —25,5*1; —32,6*2                         | [119]      |
| Диспрозий, монокристаллический, RRR = 16       | $T < T_C$ | См. рис. 30.75                           |                                          | [120]      |
| Тербий 99,9%, RRR = 46, поликристаллический    | $T > T_C$ | —4,4                                     | —42                                      | [121]      |
| То же, RRR = 20, монокристаллический           | $T > T_C$ | —4,0*1; —1,1*2                           | —52*1; —40*2                             | [122]      |
| Тербий монокристаллический                     |           | См. рис. 30.76                           |                                          | [123]      |
| Эрбий поликристаллический                      | $T > T_C$ | —0,34                                    | —                                        | [70]       |
| Эрбий монокристаллический                      | $T > T_C$ | —3,6*1; 0,3*2                            | —9,4*1; 4,4*2                            | [124]      |

\*1 В ||  $c_0$ .

\*2 В в базисной плоскости.

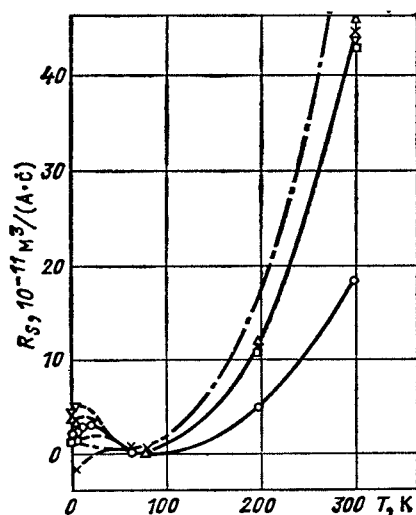


Рис. 30.70. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла  $R_s$  для усов Fe [110] (штрихпунктирная линия — для поликристаллического Fe [109]):

| Образец | Направление $I$ и оси усов Fe | Направление В | Направление ЭДС Холла | RRR |
|---------|-------------------------------|---------------|-----------------------|-----|
| ×       | [111]                         | [110]         | [112]                 | 196 |
| △       | [111]                         | [110]         | [112]                 | 213 |
| ○       | [100]                         | [010]         | [001]                 | 213 |
| □       | [100]                         | [010]         | [001]                 | 452 |
| ▽       | [100]                         | [010]         | [001]                 | 180 |



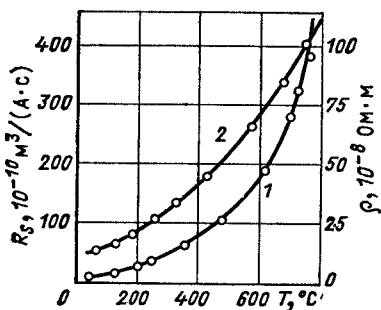


Рис. 30.71. Температурные зависимости аномального коэффициента Холла  $R_s$  (1) и удельного электросопротивления  $\rho$  (2) для Fe [111]

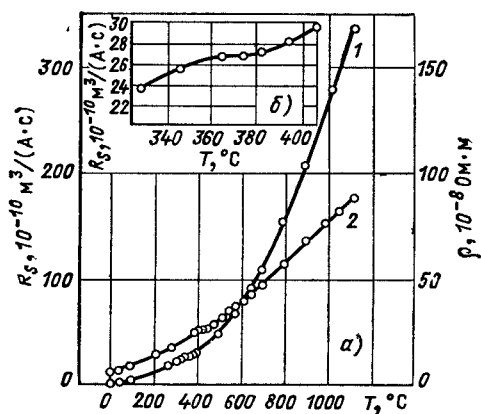


Рис. 30.72. Температурные зависимости аномального коэффициента Холла  $R_s$  (1) и удельного электросопротивления  $\rho$  (2) для Co [112] (а) и температурное изменение в окрестности фазового превращения (б)

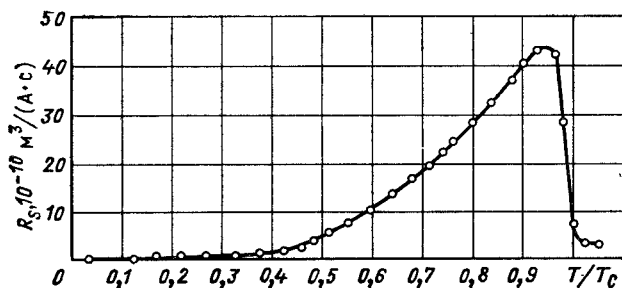


Рис. 30.73. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла  $R_s$  для Ni [115] ( $T_c$  — температура Кюри)

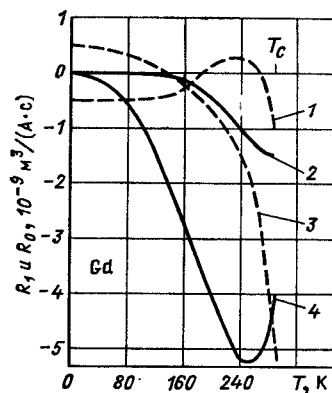


Рис. 30.74. Температурная зависимость аномального  $R_1$  и обыкновенного  $R_0$  коэффициентов Холла для монокристалла Gd [64]:

1 —  $R_0$ , В в базисной плоскости; 2 —  $R_1$ , В в базисной плоскости; 3 —  $R_0$ , В  $\parallel c$ ; 4 —  $R_1$ , В  $\parallel c$

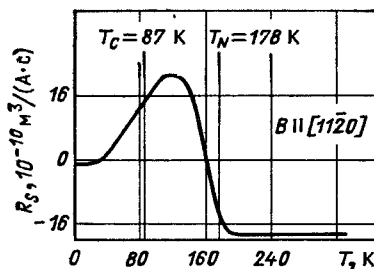


Рис. 30.75. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла  $R_s$  для монокристалла Dy [120]

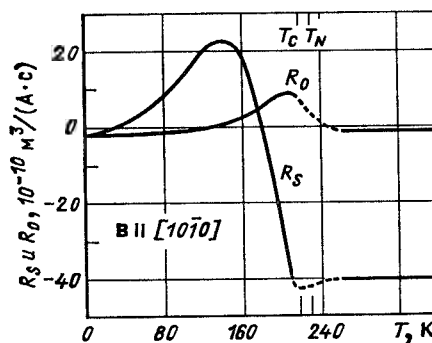


Рис. 30.76. Температурные зависимости обыкновенного  $R_0$  и аномального  $R_s$  коэффициентов Холла для монокристалла Tb [123]

### 30.6. ТЕРМОМАГНИТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.9 и 30.10 и на рис. 30.77 — 30.82 приведены данные о термомагнитных характеристиках металлов.

Таблица 30.9. Значения термомагнитных коэффициентов для металлов

| Металл, чистота        | T, К | $10^{-8} A, (B \cdot c)$ | $10^{-8} Q, (K \cdot c)$ | Литература |
|------------------------|------|--------------------------|--------------------------|------------|
| Алюминий 99,5%         | 313  | -0,63                    | +0,39                    | [125]      |
| Вольфрам               | 332  | +1,5                     | -10                      | [125]      |
| Золото* <sup>1</sup>   |      | См. рис.                 | 30,77                    | [126]      |
| Иридий                 |      | См. рис.                 | 30,78                    | [127]      |
| Иридий, RRR = 23       | 323  | +0,55                    | -0,05                    | [125]      |
| То же                  | 300  | —                        | -0,44                    | [81]       |
| Иттрий* <sup>2</sup>   | 293  | —                        | —                        | [128]      |
| Кадмий                 | 320  | +0,89                    | -1,20                    | [125]      |
| Калий* <sup>1</sup>    |      | См. рис.                 | 30,61                    | [68]       |
| Литий* <sup>1</sup>    |      | См. рис.                 | 30,62                    | [71]       |
| Марганец               | 330  | —                        | +0,15                    | [125]      |
| Медь* <sup>3</sup>     |      | См. рис.                 | 30,77                    | [126]      |
| Молибден               | 333  | —                        | -1,72                    | [125]      |
| Натрий* <sup>1</sup>   |      | См. рис.                 | 30,66                    | [68]       |
| Ниобий                 |      | См. рис.                 | 30,79                    | [129]      |
| Олово                  | 330  | —                        | -0,04                    | [125]      |
| Осмий, RRR = 12        | 300  | —                        | -2,32                    | [81]       |
| Палладий* <sup>4</sup> | 300  | -0,487                   | +3,27                    | [125]      |
| Платина, RRR = 5,4     | 323  | -0,21                    | —                        | [125]      |
| То же                  | 300  | —                        | -1,68                    | [81]       |
| Рений, RRR = 447       | 300  | —                        | -6,4                     | [81]       |
| Родий                  |      | См. рис.                 | 30,80                    | [130]      |
| Рубидий* <sup>1</sup>  |      | См. рис.                 | 30,68                    | [71]       |
| Рутений                |      | См. рис.                 | 30,80                    | [130]      |
| Свинец                 | 300  | —                        | -0,05                    | [125]      |
| Серебро* <sup>1</sup>  |      | См. рис.                 | 30,77                    | [126]      |
| Таллий                 | 333  | —                        | -0,37                    | [125]      |
| Тантал                 |      | См. рис.                 | 30,80                    | [130]      |
| Цинк                   | 323  | +1,29                    | -2,40                    | [125]      |

\*<sup>1</sup> Для металлов со знаком \*<sup>1</sup> представлены рисунки температурных зависимостей коэффициентов Риги — Ледюка  $A$ , значения которых умножены на  $L_0 T \left( L_0 = -\frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{Ом}/\text{К}^2 \right)$  для более удобного сравнения их с коэффициентами Холла.

\*<sup>2</sup>  $P = 75 \cdot 10^{-4} \text{ К} \cdot \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с})$ ;  
 \*<sup>3</sup>  $P = -1,446 \cdot 10^{-8} \text{ К} \cdot \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с})$ ;  
 \*<sup>4</sup>  $P = 16,2 \cdot 10^{-8} \text{ К} \cdot \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с})$ .

Таблица 30.10. Значения термомагнитных коэффициентов для ферромагнитных металлов

| Металл  | T, К    | B, К  | $P_1, 10^{-8} \text{ К} \cdot \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с})$ |
|---------|---------|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Железо  | 313     | 2,3   | -20,3                                                                              |
| Кобальт | 298     | 0,95  | 87                                                                                 |
| »       | 300—900 | —     | —                                                                                  |
| Никель  | 313     | 0,667 | 55                                                                                 |
| »       | 2—450   | —     | —                                                                                  |

Продолжение табл. 30.10

| Металл  | $10^{-8} \frac{A_1}{\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})}$ | $Q_1, 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{(\text{К} \cdot \text{с})}$ | Литература |
|---------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| Железо  | 3,28                                                       | —20,4                                                       | [131]      |
| Кобальт | 3,77                                                       | 19                                                          | [125]      |
| »       | —                                                          | См. рис. 30.81                                              | [132]      |
| Никель  | —49                                                        | 48,2                                                        | [133]      |
| »       | —                                                          | См. рис. 30.82                                              | [125]      |

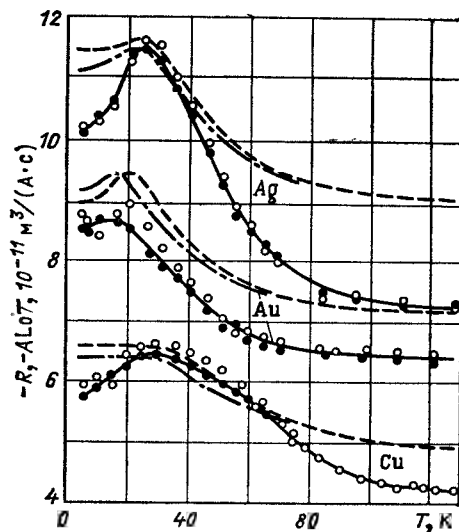


Рис. 30.77. Температурные зависимости коэффициентов Холла  $R$  и Риги — Ледюка  $ALoT$  для Ag, Au и Cu [126]: — — —  $R$ ,  $B=0,935$  Тл; — · — · —  $R$ ,  $B=0,518$  Тл; ○ —  $ALoT$ ,  $B=0,935$  Тл; ● —  $ALoT$ ,  $B=0,518$  Тл

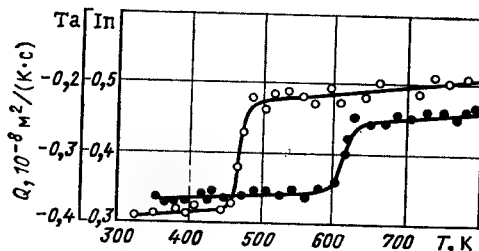


Рис. 30.78. Температурная зависимость коэффициента Нернста для Tl (●) и In (○) в твердом и жидком состояниях [127]

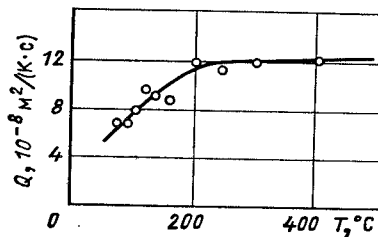


Рис. 30.79. Температурная зависимость коэффициента Нернста для Nb [129]

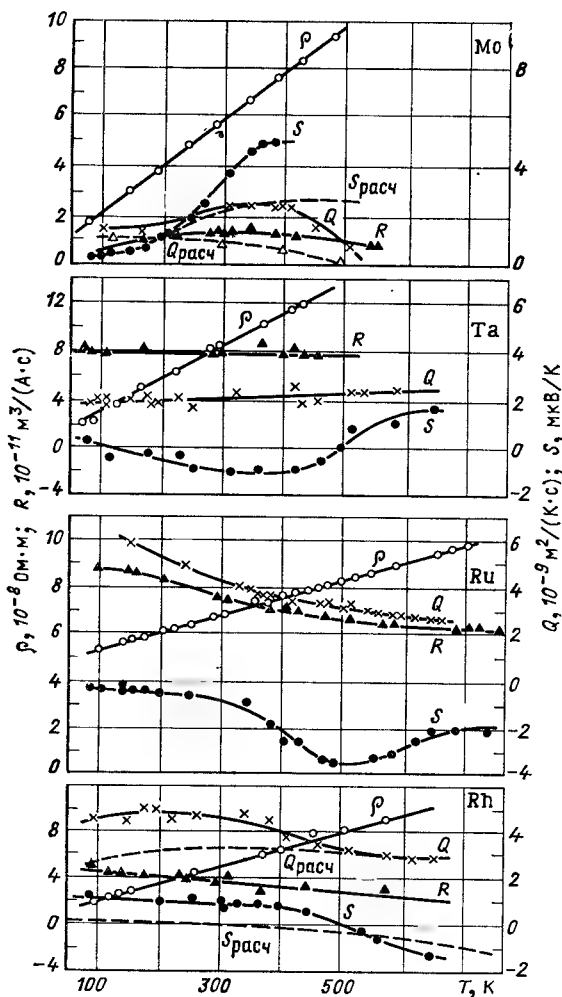


Рис. 30.80. Температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$ , термо-ЭДС  $S$ , константы Холла  $R$  и константы Нернста  $Q$  для некоторых материалов [130]

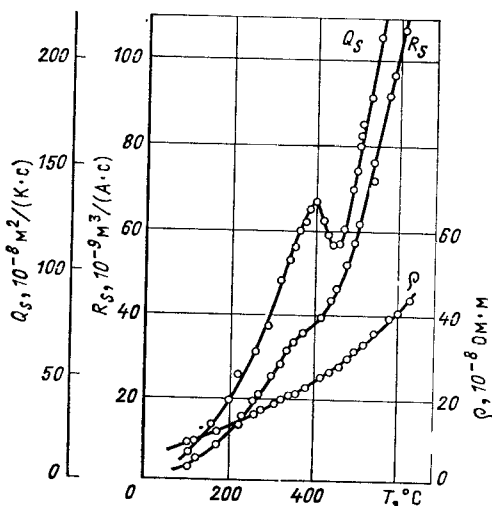


Рис. 30.81. Температурные зависимости коэффициентов Холла  $R_s$ , Нернста  $Q_s$  и удельного электросопротивления  $\rho$  для Co [132]

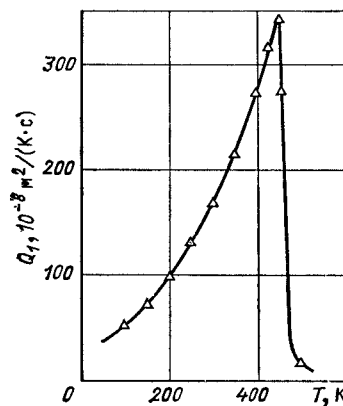


Рис. 30.82. Температурная зависимость коэффициента Нернста  $Q_1$  для Ni [125]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайдуков Ю. П. // Успехи физ. наук. 1970. Т. 100. Вып. 3. С. 449—466.
2. Крэкнелл А., Уонг К. Поверхность Ферми: Пер. с англ. / Под ред. В. Я. Кравченко. М.: Атомиздат. 1978.
3. Harrison W. A., Webb M. B. The Fermi Surface. N. Y. — Lond.: John Wiley. 1960.
4. Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Каганов М. И. Электронная теория металлов. М.: Наука. 1971.
5. Meaden G. T. Electrical resistance of metals. N. Y.: Plenum Press. 1965.
6. Fawcett E. // Advances Phys. 1964. Vol. 13, N 50. P. 139—153.
7. Hurd C. M. The Hall Effect in Metals and Alloys. N. Y.: Plenum Press, 1972.
8. Fickeff F. R. // Phys. Rev. 1971. Vol. B3. P. 1941.
9. Rocofyllou E., Papathanassopoulou C. // Physica. 1980. Vol. BC 100, N 1. P. 99—100.
10. Justi E., Kramer J. // Physical Z. 1940. Bd 41. S. 197—205.
11. Kapitza P. Proc. Roy. Soc. (Lond.), 1929. Vol. A123. P. 292, 342.
12. Алексеевский Н. Е., Егоров В. С. // Журн. эксперим. и теорет. физ. 1963. Т. 45, № 2. С. 388—391.
13. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften I. Berlin, Göttingen — Heidelberg: Springer — Verlag, 1959.
14. Волкенштейн Н. В., Новоселов В. А., Старцев В. Е. // Физика металлов и металловедение. 1966. Т. 22, № 2. С. 175—180.
15. Reed W. A., Marcus J. A. // Phys. Rev. 1962. Vol. 126. N 4. P. 1298—1300.
16. McClure P. W., Spry W. J. // Phys. Rev. 1968. Vol. 165. N 3. P. 809—815.
17. Jánoš Š., Fener A., Flachbart K. // Phys. Stat. Sol. (b). 1977. Vol. 81. N 1. P. K19—K23.
18. Justi E. Physical Z. 1940. Bd 41. S. 486—490.
19. Гайдуков Ю. П. // Журн. эксперим. и теорет. физ. 1959. Т. 37, № 5. С. 1281—1291.

20. Волоцкая В. Г.//Там же. 1963. Т. 45, № 1. С. 49—51.
21. Лазарев Б. Г., Нахимович Н. М., Парфенова Е. А.//Там же. 1938. Т. 9, № 10. С. 1169—1178.
22. Penz P. A., Bowers R.//Phys. Rev. 1968. Vol. 172. No 3. P. 991—1000.
23. Guggen D., Jones B. K.//Helv. Phys. Acta. 1963. Vol. 36, No 1. P. 6—11.
24. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 38, № 6. С. 1720—1722.
25. Алексеевский Н. Е., Егоров В. С., Карстенс Г. Э., Козак Б. Н.//Там же. 1962. Т. 43, № 1. С. 731—733.
26. Babiskin J., Siebenmann P. G.//Phys. Kondens. Mater. 1969. Vol. 9(1/2). P. 113—121.
27. Nagasawa H.//Phys. Lett. 1972. Vol. 414, No 1. P. 39—40.
28. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1959. Т. 36, № 2. С. 446—449.
29. Алексеевский Н. Е., Дубровин А. В., Карстенс Г. Э., Михайлов Н. Н.//Там же. 1968. Т. 54, № 3. С. 350—353.
30. Aschermann G., Justi E.//Physikal. Z. 1942. Bd. 43. S. 207—210.
31. Алексеевский Н. Е., Егоров В. С., Козак Б. Н.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1963. Т. 44, № 3. С. 1116—1118.
32. Schulze R.//Physik. Z. 1941. Bd. 42. S. 297.
33. MacDonald D. K. C.//Philos. Mag. 1957. Vol. 2, No 13. P. 97—104.
34. Болотин Г. А., Новоселов Н. А., Старцев В. Е.//Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33, № 4. С. 740—743.
35. Боровик Е. С.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1954. Т. 27, № 3. С. 355—368.
36. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Там же. 1959. Т. 37, № 3. С. 672—677.
37. Young R. C.//Phys. Rev. 1967. Vol. 163, No 3. P. 676—685.
38. Justi E.//Ann. Physik. 1948. Bd(6)3. S. 183—190.
39. Reed W. A., Brenner G. F.//Phys. Rev. 1963. Vol. 130. No 2. P. 565—576.
40. Бабушкина Н. А.//Докл. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 155, № 6. С. 1290—1292.
41. McEwen K. A., Werber G. D., Roeland L. W.//Physica. 1977. Vol. 86—88B. P. 531—532.
42. Akhavan M., Blackstead H. A.//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13, No 3. P. 1209—1215.
43. Akhavan M., Blackstead H. A.//Ibid. 1973. Vol. 8, No 9. P. 4258—4261.
44. Isin A., Colemann R. V.//Phys. Rev. 1966. Vol. 142, No 2. P. 372—378.
45. Colemann R. V., Morris R. S., Sellmeyer D. J.//Phys. Rev. B. 1973. Vol. 8, No 1. P. 317—331.
46. Борма К. К., Зубов В. В.//Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 20, № 1. С. 135—137.
47. Белов К. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1951. Т. 21, № 5. С. 809—812.
48. Kaul S. N.//J. Phys. F. 1977. Vol. 7, No 10. P. 2091—2098.
49. Белов К. П., Никитин С. А.//Физика металлов и металловедение. 1962. Т. 13, № 1. С. 43—48.
50. Frank V.//Appl. Sci. Res. 1958. Vol. B7. P. 41—45.
51. Barnard R. D., Abdel Rahiem AEE.//J. Phys. F. 1980. Vol. 10, No 12. P. 2739—2749.
52. Боровик Е. С.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1952. Т. 23, № 1. С. 83—87.
53. Shiozaki J.//Phys. Lett. 1974. Vol. A50. P. 203—204.
54. Амיתי Е. Б., Ковалевская Ю. А., Ковдри Ю. З.//Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 905—908.
55. Reynolds J. M., Hemstreet H. M.//Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 1203—1207.
56. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18. С. 784—786.
57. Alderson J. E., Farrel T., Hurd C. M.//Phys. Rev. 1968. Vol. 174. P. 729—736.
58. Cooper J. N., Cotti P., Rasmussen F. B.//Phys. Lett. 1965. Vol. 19. P. 560—562.
59. Ozimek E. J., Leisure R. G.//Ibid. 1978. Vol. A66, No 5. P. 413—415.
60. Gehlhoff P. O., Justi E., Kohler M.//Z. Naturforsch. 1950. Vol. 5a. S. 16—18, 1949. Vol. 4a. S. 561—563.
61. Anderson G. S., Legvold S., Spedding F. H.//Phys. Rev. 1959. Vol. 111, No 5. P. 257—261.
62. Anderson J. E., Hurd C. M.//Solid State Comm. 1972. Vol. 11. P. 1245—1248.
63. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1967. Т. 24. С. 1105—1107.
64. Lee R. S., Legvold S.//Phys. Rev. 1967. Vol. 162. P. 431—435.
65. Saeger K. E., Luck R.//Phys. Kond. Mater. 1969. Vol. 9. P. 91—94.
66. Stringer J., Hill J., Huglin A. S.//Philos. Mag. 1970. Vol. 21. P. 53—61.
67. Cirles W.//Z. Physik. 1957. Bd. 147. S. 481—485.
68. Fletcher R., Friedman A. J.//Phys. Rev. 1973. Vol. B8. P. 5381—5390.
69. Frank V., Jeppesen O. G.//Ibid. 1953. Vol. 89. P. 1153—1154.
70. Kevane C. J., Legvold S., Spedding F. H.//Ibid. 1953. Vol. 91. P. 1372—1379.
71. Eletcher R.//Ibid. 1977. Vol. 15. P. 3602—3608.
72. Alty J. L., Stringer J.//Phys. Stat. Sol. 1969. Vol. 32. P. 243—246.
73. Foner S.//Phys. Rev. 1957. Vol. 107. P. 1513—1516.
74. Meaden G. P. T., Pelloux-Gervais P.//Cryogenics. 1967. Vol. 7. P. 161—166.
75. Barnard R. D.//J. Phys. F. 1980. Vol. 10, No 10. P. 2251—2255.
76. Черепанов В. И., Старцев В. Е., Волкенштейн Н. В.//Физика низких температур. 1979. Т. 5. С. 1162—1167.
77. Justi E.//Ann. Physik. 1948. Vol. 6. P. 183—186.
78. Berlincourt T. G.//Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 969—977.
79. Andrewartha G. G., Evans E. J. Philos. Mag. 1941. Vol. 31. P. 265—282.
80. Качинский В. Н.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1962. Т. 43, № 10. С. 1158—1163.
81. Немченко В. М., Львов С. Н., Малько П. И., Делиев В. Н.//Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33, № 3. С. 540—545.
82. Plate H.//Phys. Kond. Mater. 1966. Vol. 4. P. 355—359.
83. Schwallier R.//Compt. rend. 1967. Vol. 264. P. 1064—1067.
84. Brodsky M. B.//Phys. Rev. 1965. Vol. 137. P. A1423—1428.
85. Волков Д. Н., Козлова Т. М., Прудников В. Н., Козис Е. О.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1968. Т. 55, № 6. С. 2103—2107.
86. Köster W., Hagmann D., Saeger K. E.//Z. Metallkunde. 1963. Bd. 54. S. 619—622.
87. Факидов И. Г.//Докл. АН СССР. 1948. Т. 63. № 2. С. 123—125.
88. Justi E.//Z. Naturforsch. a. 1949. Bd. 4. S. 472—474.
89. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7, № 11. С. 3213—3217.
90. Takano K., Sato T.//J. Phys. Soc. Japan. 1965. Vol. 20. P. 2013—2016.
91. Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 41, № 2. С. 354—357.

92. Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.//Физика металлов и металловедение. 1963. Т. 16, № 2. С. 298—301.
93. Smith A. W.//Phys. Rev. 1916. Vol. 8. P. 79—83.
94. Krautz E., Schultz H.//Z. Angewdte Phys. 1963. Vol. 15. P. 1—6.
95. Scovill G. N.//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 247—248.
96. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. — Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 20. С. 508—511.
97. Foner S.//Phys. Rev. 1957. Vol. 107. P. 1513—1516.
98. Амитин Е. Б., Ковалевская Ю. А.//Физика твердого тела. 1968. Т. 10, № 6. С. 1884—1886.
99. Kendall P. W.//J. Nucl. Mat. 1970. Vol. 35. P. 41—50.
100. Lane Y. S., Huglin A. S., Stringer J.//Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A1060—A1068.
101. Busch G., Guntherodt H. — J.//Phys. Kond. Mater. 1967. Vol. 6. P. 325—327; Advances. Phys. 1967. Vol. 16. P. 651—660.
102. Busch G., Y. Thieche//Phys. Kond. Mater. 1963. Vol. 1. P. 78—81.
103. Greenfield A.//Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A1589—A1595.
104. Busch G., Guntherodt H. — J., Kunzi H. U.//Phys. Lett. 1970. Vol. 32A. P. 376—377.
105. Shackle P. W.//Philos. Mag. 1970. Vol. 21. P. 987—1002.
106. Busch G., Guntherodt H. — J., Kunzi H. U., Schlapbach L.//Phys. Lett. 1970. Vol. 31A. P. 191—192.
107. Факидов И. Г.//Докл. АН СССР. 1948. Т. 63. С. 123—125.
108. Soffer S., Dreesden J. A., Pugh E. M.//Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. A668—A675.
109. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 38. С. 64—68.
110. Dheer P. N.//Phys. Rev. 1967. Vol. 156. P. 637—644.
111. Tsonkalas J. A.//Phys. Stat. Sol. (a). 1974. Vol. 22, № 1. P. K59—K63.
112. Tsonkalas J. A.//Ibid. 1974. Vol. 23, № 1. P. K41—K45.
113. Hugnenin R., Rivier D.//Helv. Phys. Acta. 1965. Vol. 38. P. 900—912.
114. Dutta Roy S. K., Subrahmanyam A. V.//Phys. Rev. 1969. Vol. 177. P. 1133—1138.
115. Kaul S. N.//Ibid. 1979. Vol. B20. № 12. P. 5122—5130.
116. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.//Журнал эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 50. С. 1505—1509.
117. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.// Физика твердого тела. 1966. Т. 8. С. 1895—1898.
118. Cullen P. R., Rhyne J. J., Mancini F.//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 1178—1181.
119. Волкенштейн Н. В., Григорова И. К., Федоров Г. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. С. 780—785.
120. Rhyne J. J.//Phys. Rev. 1968. Vol. 172. № 2. P. 523—529.
121. Бабушкина Н. А.//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 3026—3032.
122. Федоров Г. В., Волкенштейн Н. В.//Там же. 1970. Т. 12. С. 1374—1379.
123. Rhyne J. J.//Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1001—1003.
124. Rhyne J. J., O'Connor M. C.//Bull. Amer. Phys. Soc. 1969. Vol. 14. P. 306—310.
125. Landolt-Bornstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Göttingen — Heidelberg: Springer-Verlag, 1959.
126. Fletcher R., Friedman A. J., Stot M. J.//J. Phys. F: Metal Phys. 1972. Vol. 2, № 4. P. 729—762.
127. Кувандилов О. К., Субхакулов И., Даминов А.// Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44. Вып. 3. С. 670—671.
128. Zeechina L.//Phys. Stat. Sol. 1970. Vol. 42. P. K153—K155.
129. Кувандилов О. К., Черепанов А. В., Васильева Р. П., Шакиров В. О.//Изв. вузов. Физика. 1977. № 8. С. 128—129.
130. Мясникова К. П., Васильева Р. П., Черемушкина А. В. — Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1975. № 6. С. 185—188.
131. Butler E. H., Pugh E. M.//Phys. Rev. 1940. Vol. 57. P. 916—920.
132. Черемушкина А. В., Васильева Р. П.//Физика твердого тела. 1966. Т. 8, № 3. С. 822—825.
133. Rinder W., Koch K. M. Z. Naturforsch. a. 1958. Bd 13. S. 26—528.

## Глава 31

# ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Л. А. Новицкий

### 31.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В главе приведены значения оптических характеристик твердых, жидких и газообразных веществ при различных параметрах их состояния. Даны аналитические зависимости, позволяющие использовать эти значения при практических расчетах. Оговаривается достоверность приведенных значений оптических характеристик (указывается обычно средняя квадратическая относительная погрешность измерения при доверительной вероятности 0,68). В некоторых таблицах указания о погрешности измерения отсутствуют. Это соответствует случаям, когда в литературных источниках достоверность данных не была оговорена. Значения оптических характеристик в таких таблицах следует рассматривать как ориентировочные.

Определение оптических характеристик и их единицы даются в соответствии с ГОСТ 7601—78, ГОСТ 23778—79, СЭВ 1052—78, ГОСТ 13659—78, ГОСТ 15130—79, ГОСТ 9411—81 Е.

*Показателем преломления  $n$*  называют отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме  $c$  к фазовой скорости излучения в данной среде;  $n$  для длины волны  $\lambda = 546,07$  нм называют *основным показателем преломления  $n_{осн}$* . Величины  $n$  и  $n_{осн}$  — безразмерные.

Уменьшение интенсивности излучения в веществе в результате поглощения характеризуется *главным показателем поглощения  $\chi$* .

Величины  $n$  и  $\chi$  называют *оптическими постоянными*.

Связь между оптическими постоянными, электрическими и магнитными характеристиками диэлектрической

среды, являющаяся важнейшим выводом электромагнитной теории света, определяется уравнением

$$n^2 = \epsilon \mu,$$

а при  $\mu \approx 1$

$$n^2 = \epsilon,$$

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость.

Для ряда газообразных и жидких диэлектриков результаты расчета  $n$  с помощью этого уравнения хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Для металлов связь их оптических постоянных с электрическими характеристиками задается уравнениями

$$n^2(1 - \chi^2) = \epsilon$$

и

$$n^2\chi = 2\pi\sigma^*/\omega,$$

где  $\sigma^*$  — удельная проводимость металла;  $\omega$  — круговая частота потока излучения.

Результаты расчетов по этим уравнениям достаточно хорошо согласуются с данными эксперимента в инфракрасной области спектра, где для оптических свойств металла главную роль играют свободные электроны.

В видимой и ультрафиолетовой областях спектра оптические свойства вещества в сильной степени зависят от связанных электронов. Значительно более явно выраженной становится зависимость  $n$  от длины волны потока излучения; выводы электромагнитной теории, приписывающие величине  $n$  некоторое квазипостоянное значение, характерное для данного вещества, расходятся с действительностью.

В этом случае уравнения, учитывающие длину волны (частоту) излучения, его затухание в веществе, действие окружающих молекул на смещение электрона под воздействием внешнего поля, влияние свободных и связанных электронов, выводятся из теории дисперсии и имеют вид:

для диэлектриков

$$n^2 = 1 + 4\pi \frac{e}{m} N \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2};$$

для металлов

$$\begin{aligned} n^2(1 - \chi^2) &= 1 - \frac{4\pi N e^2}{m} \frac{1}{\omega^2 + (g_0/m)^2} + \\ &+ \sum_k \frac{4\pi N_k e^2}{m} \frac{\omega_k^2 - \omega^2}{(\omega_k^2 - \omega^2)^2 + (g_k/m)^2 \omega^2} \\ \text{и} \quad 2n^2\chi &= \frac{4\pi N e^2}{m} \frac{g_0/m}{\omega[\omega^2 + (g_0/m)^2]} + \\ &+ \sum_k \frac{4\pi N_k e^2}{m} \frac{\omega(g_k/m)}{(\omega_k^2 - \omega^2)^2 + (g_k/m)^2 \omega^2}. \end{aligned}$$

Здесь  $\omega$  — круговая частота внешнего электромагнитного поля, определяемая длиной волны падающего потока излучения;  $\omega_0$  — круговая частота собственных колебаний свободных электронов атомов вещества, зависящая от их природы;  $\omega_k$  — круговая частота собственных колебаний электронов поляризуемости;  $e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона соответственно;  $N$ ,  $N_k$  — число атомов в единице объема, испытывающих поляризацию среды, соответствующее различным собственным частотам  $\omega_k$ ;  $g_0$ ,  $g_k$  — коэффициенты сопротивления среды для частот, близких к  $\omega_0$  и  $\omega_k$  соответственно.

Зная  $\omega$  и  $\sigma^*$ , можно определить глубину проникновения  $\delta$  излучения в металлическую среду (так называемую толщину скин-слоя при нормальном скин-эффекте), пользуясь уравнением

$$\delta = c / \sqrt{2\pi\omega\sigma^*}.$$

Величина  $\delta$  измеряется в единицах длины.

Расчет показателя преломления  $n$  для любой длины волны в пределах определенного интервала длин волн производится по дисперсионным формулам; эти формулы для различных классов материалов имеют схожее построение, но различаются обычно коэффициентами формулы дисперсии. Так, расчет  $n$  для воздуха в интервале длин волн в вакууме  $\lambda = 0,2 \div 50$  мкм выполняется по формуле дисперсии

$$n = 1 + 64,328 \cdot 10^{-6} + \frac{29498,1 \cdot 10^{-6}}{146 - 10^6 \lambda^{-2}} + \frac{255,4 \cdot 10^{-6}}{41 - 10^6 \lambda^{-2}};$$

расчет  $n$  в интервале длин волн 0,365—1,0139 мкм для оптического бесцветного стекла производится по формуле дисперсии

$$n^2 = A_1 + A_2 \lambda^2 + A_3 \lambda^{-2} + A_4 \lambda^{-4} + A_5 \lambda^{-6} + A_6 \lambda^{-8},$$

где  $A_1, \dots, A_6$  — коэффициенты формулы дисперсии, зависящие от марки стекла.

Средней дисперсией  $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$  называют разность показателей преломления волн длиной  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Основной средней дисперсией  $n_{F'} - n_{C'}$  называют разность показателей преломления для длин волн  $F'$  и  $C'$  (спектральные линии Фраунгофера 479,99 и 643,85 нм соответственно).

Коэффициентом дисперсии  $v_3$  называют отношение вида

$$v_3 = (n_3 - 1)/(n_1 - n_2),$$

где  $n_1, n_2, n_3$  — показатели преломления, соответствующие длинам волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ .

Основным коэффициентом дисперсии  $v_{осн}$  называют отношение

$$v_{осн} = (n_{осн} - 1)/(n_{F'} - n_{C'}).$$

Величины  $v_3$  и  $v_{осн}$  — безразмерные

Термооптической постоянной  $\beta_{осн}$ ,  $K^{-1}$ , называют изменение основного показателя преломления при повышении температуры вещества на 1 К;  $\beta_{осн}$  определяется выражением

$$\beta_{осн} = \Delta n_{осн} / \Delta T,$$

где  $\Delta n_{осн}$  — изменение основного показателя преломления;  $\Delta T$  — изменение температуры, К.

Коротковолновой границей пропускания  $\lambda_{min}$  называют длину волны со стороны более коротких волн, при которой спектральный коэффициент внутреннего пропускания для толщины вещества 10 мм не ниже 0,50. Аналогично определяется длинноволновая граница пропускания  $\lambda_{max}$ , но для длинноволновой части спектра.  $\lambda_{min}$  и  $\lambda_{max}$  измеряют в единицах длины.

Коэффициент пропускания  $\tau$  представляет собой отношение потока излучения, прошедшего сквозь тело, к потоку излучения, упавшему на него.

Коэффициентом внутреннего пропускания  $\tau^*$  называют отношение потока излучения, прошедшего к выходной поверхности среды, к потоку излучения, вошедшего в среду.

Коэффициентом отражения называют отношение потока излучения, отраженного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него.

Характер отражения света поверхностью данного вещества зависит от качества ее обработки. В общем случае отражение имеет характер *направленно-рассеянного* отражения, когда максимум силы отраженного света совпадает с направлением, соответствующим закону отражения. В зависимости от того, какая из составляющих отраженного потока (зеркальная или диффузная) превалирует, отражение рассматривается как зеркальное (коэффициент зеркального отражения  $\rho$ ) или как диффузное (коэффициент диффузионного отражения  $\rho_{\text{диф}}$ ). Поверхности, для которых в отраженном потоке излучения преобладает диффузная составляющая, в той или иной степени приближаются к поверхностям, яркость которых не зависит от направления, а сила света убывает пропорционально косинусу угла между нормалью к поверхности и рассматриваемым направлением (равнораспределенные, или ламбертовские поверхности).

*Коэффициентом поглощения  $a$*  называют отношение потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, упавшему на него.

Величины  $\tau$ ,  $\tau^*$ ,  $\rho$  и  $a$  — безразмерные. Связь между  $\tau$ ,  $\rho$  и  $a$  устанавливается соотношением

$$\tau + \rho + a = 1.$$

Для потока излучения длины волны  $\lambda$  соответствующие коэффициенты обозначают  $\tau_\lambda$ ,  $\tau_\lambda^*$ ,  $\rho_\lambda$  и  $a_\lambda$  (*спектральные коэффициенты пропускания, внутреннего пропускания, отражения и поглощения*).

Значения  $\tau$ ,  $\tau^*$ ,  $\rho$  и  $a$  зависят от спектрального состава падающего на тело потока излучения. В частном случае, если излучатель имитирует Солнце, то соответствующий коэффициент дополняется в индексе буквой  $S$ , например: коэффициент поглощения солнечного излучения  $a_S$ .

*Показателем поглощения  $a$*  называют величину, обратную расстоянию, на котором в результате поглощения в веществе поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз. Для потока излучения с длиной волны  $\lambda$  соответствующую величину обозначают  $a_\lambda$  и называют *спектральным показателем поглощения*. Единицы величин  $a$  и  $a_\lambda$  —  $\text{м}^{-1}$ ,  $\text{мм}^{-1}$  и т. д.

Величины  $a_\lambda$  и  $\chi$  связаны соотношением

$$a_\lambda = 4\pi\chi/\lambda,$$

а величины  $a$  и  $\tau^*$ ,  $a_\lambda$  и  $\tau_\lambda^*$  — соотношениями

$$\tau^* = 10^{-ad}; \quad \tau_\lambda^* = 10^{-a_\lambda d},$$

где  $d$  — толщина поглощающего слоя вещества, м, мм и т. д.

Для удобства сопоставления  $\tau_\lambda^*$  различных веществ, оптически однородных в направлении распространения излучения, коэффициент внутреннего пропускания приводят обычно к единичной толщине поглощающего слоя. Расчетная формула для такого приведения имеет вид

$$\lg \tau_{\lambda 1}^* = \lg \tau_\lambda^* \frac{1}{d},$$

где  $\tau_{\lambda 1}^*$  — спектральный коэффициент внутреннего пропускания для толщины поглощающего слоя, равной единице.

Коэффициенты  $\tau$  и  $\tau^*$  связаны соотношением

$$\tau^* = \tau / (1 - \rho)^2$$

при одинаковых коэффициентах отражения на входной и выходной границах среды.

*Оптической плотностью* называют логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания, т. е.

$$D = \lg(1/\tau) \text{ и } D^* = \lg(1/\tau^*).$$

Тогда

$$D^* = D + 2 \lg(1 - \rho).$$

Если поток излучения проходит последовательно через среды с коэффициентом пропускания  $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots$  и оптическими плотностями  $D_1, D_2, D_3 \dots$ , то для совокупности этих сред коэффициент пропускания  $\tau$  и суммарная оптическая плотность  $D$  вычисляются по формулам

$$\tau = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \dots$$

и

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \dots$$

Зависимость  $\rho$  от угла падения  $\alpha_1$  и показателей преломления  $n'$  и  $n''$  граничащих диэлектрических сред (излучение распространяется из среды с показателем преломления  $n'$  в среду с показателем преломления  $n''$ ) определяется выражением

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} + \frac{\lg^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\lg^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \right],$$

где  $\alpha_2$  — угол преломления.

Величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  связаны законом преломления:

$$n' \sin \alpha_1 = n'' \sin \alpha_2.$$

При нормальном падении

$$\rho = \left( \frac{n'' - n'}{n'' + n'} \right)^2.$$

При нормальном падении потока излучения из воздуха на металлическую поверхность

$$\rho = \frac{(n'' - 1)^2 + \chi^2 (n'')^2}{(n'' + 1)^2 + \chi^2 (n'')^2}.$$

Для оптически активных веществ дополнительно вводятся специфические характеристики, поясняемые ниже.

*Показатель преломления обыкновенного луча  $n_o$*  представляет собой отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости обыкновенного луча с длиной волны  $\lambda$  в анизотропной среде.

*Показателем преломления необыкновенного луча  $n_e$*  называют отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости необыкновенного луча с длиной волны  $\lambda$  в анизотропной среде. Если распространение необыкновенного луча рассматривается в направлении, перпендикулярном оптической оси анизотропной среды (одноосная анизотропия), или в направлении, перпендикулярном биссектрисе угла между оптическими осями (двуосная анизотропия), то  $n_e$  называют *главным показателем преломления необыкновенного луча* (ГПП).

Важной характеристикой анизотропных тел является *показатель двулучепреломления  $b$* , представляющий собой разность между главным показателем преломления необыкновенного луча в анизотропной среде и показателем преломления обыкновенного луча, т. е.

$$b = n_e - n_o.$$

*Оптическим коэффициентом напряжения  $B$ , Па<sup>-1</sup>* называют коэффициент пропорциональности между показателем двулучепреломления  $b$ , обусловленного механическими деформациями, и разностью главных нормальных напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$ , возникающих при этих де-

формациях, плоскости действия которых совпадают с плоскостями поляризации лучей  $e$  и  $o$ .

Если деформируемый образец уподобить одноосному кристаллу, а падающий параллельный пучок лучей направить перпендикулярно сжимающей (растягивающей) силе, то зависимость между  $n_e - n_o$  и  $\sigma_2 - \sigma_1$  принимает вид

$$n_e - n_o = B(\sigma_2 - \sigma_1).$$

Значение величины  $B$  для соответствующего вещества зависит от длины волны и температуры.

Для кристаллов низшей категории, оптическая индикатриса которых является трехосным эллипсоидом с тремя неравными единично-перпендикулярными осями, показатели преломления в направлении большой, средней и малой осей называют *большим* ( $n_G$ ), *средним* ( $n_m$ ) и *малым* ( $n_p$ ) *показателями преломления*.

Относительная степень поляризации  $P_\lambda$  представляет собой отношение разности интенсивностей пучков лучей с длиной волны  $\lambda$ , поляризованных ортогонально, к их сумме. Величина  $P_\lambda$  — безразмерная.

Углом полной поляризации (углом Брюстера)  $\alpha_B$  называют угол падения, при котором отраженный луч полностью поляризован перпендикулярно плоскости падения. Величина  $\alpha_B$  определяется выражением

$$\alpha_B = \arctg((n''/n').$$

В частном случае, при  $n' = 1$ ,

$$\alpha_B = \arctg n''.$$

Удельный угол вращения плоскости поляризации  $\psi$ , угл. град/мм, представляет собой угол, на который поворачивает плоскость поляризации образец кристалла толщиной  $l$  мм.

Угол вращения плоскости поляризации  $\psi$  средой толщиной  $d$  (вдоль хода луча) определяется из выражения

$$\psi = \psi_0 d.$$

Для описания веществ, являющихся в нормальных условиях оптически изотропными, но при определенных внешних условиях становящихся анизотропными, служат специальные оптические характеристики.

Магнитооптической постоянной Верде  $C_\lambda$ , угл. мин/(Гл·м), называют коэффициент пропорциональности между углом вращения плоскости поляризации  $\psi$ , обусловленным наложением магнитного поля (вектор напряженности магнитного поля совпадает с направлением распространения оптического излучения в данной среде), и произведением напряженности внешнего магнитного поля  $H$  на геометрическую длину пути  $l$  излучения в веществе.

Зависимость между  $\psi$  и  $C_\lambda$  имеет вид

$$\psi = C_\lambda l H.$$

Для соответствующего вещества  $C_\lambda$  зависит от длины волны и температуры.

Электрооптической постоянной Керра  $B_\lambda$ , м/В<sup>2</sup>, называют коэффициент пропорциональности между показателем двулучепреломления  $b$  и произведением длины волны в вакууме  $\lambda$  на напряженность  $E$  внешнего электрического поля во второй степени, вектор напряженности которого перпендикулярен направлению распространения излучения в данной среде.

Зависимость между  $b$  и  $B_\lambda$  имеет вид

$$b = B_\lambda E^2.$$

Значение  $B_\lambda$  зависит от длины волны и температуры вещества.

Линейный электрооптический эффект (эффект Покельса) в кристаллах оценивают с помощью электрооп-

тических коэффициентов  $r_{ik}$ , связывающих поляризационные характеристики веществ с напряженностью  $E$  внешнего электрического поля. Индексы  $i$  и  $k$  соответствуют определенному углу между направлениями оптической оси кристалла и электрического поля. В случае параллельности этих направлений  $i = 6$  и  $k = 3$ , т. е.  $r_{ik} = r_{63}$ .

Максимальное искусственное двулучепреломление, образующееся при распространении света вдоль оси кристалла  $z$ , определяется выражением

$$b_{\max} = \frac{n_o^3}{2} r_{63} E_z,$$

где  $E_z$  — составляющая напряженности внешнего поля, параллельная направлению  $z$ .

При исследовании процессов теплообмена, вычислении температуры тел и других тепловых расчетах используются оптические характеристики, определяющие тепловое излучение тел.

Коэффициент теплового излучения  $\epsilon_T$  — отношение энергетической светимости теплового излучателя  $M_e$  к энергетической светимости черного тела  $M_e^0$  при той же температуре в пределах пространственного угла  $2\pi$ .

Спектральный коэффициент теплового излучения  $\epsilon_\lambda$  — отношение спектральной плотности энергетической светимости теплового излучателя  $M_{e\lambda}$  к спектральной плотности энергетической светимости черного тела  $M_{e\lambda}^0$  при той же температуре и той же длине волны в пределах пространственного угла  $2\pi$ .

Величины  $\epsilon_T$  и  $\epsilon_\lambda$  — безразмерные.

Расчетные формулы имеют вид

$$M_e = \epsilon_T M_e^0 = \epsilon_T \sigma (T^4 - T_1^4);$$

$$M_{e\lambda} = \epsilon_\lambda M_{e\lambda}^0 = \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1},$$

где  $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана—Больцмана;  $T$  — температура исследуемой излучающей поверхности, К;  $T_1$  — температура среды, находящейся в тепловом равновесии с исследуемой поверхностью, К;  $C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2 = 1,43880 \cdot 10^{-2}$  м·К.

Единицы  $M_e$  и  $M_{e\lambda}$  — Вт/м<sup>2</sup> и Вт/м<sup>3</sup> соответственно.

В ряде случаев спектральную плотность энергетической светимости черного тела удобнее представить в виде функции частоты излучения  $\nu$ . В этом случае

$$M_{e\nu}^0 = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}.$$

Связь между  $\epsilon_T$  и  $\epsilon_\lambda$  устанавливается соотношением

$$\epsilon_T = \int_0^\infty \epsilon_\lambda M_{e\lambda}^0 d\lambda / \sigma T^4.$$

В объектах новой техники коэффициент  $\epsilon_T$  используется для расчетов процессов теплообмена совместно с коэффициентом поглощения  $\alpha_s$ . В частности, при расчете температуры материалов и покрытий, облучаемых солнечным излучением, широко используют коэффициенты  $\epsilon_T$  и  $\alpha_s$ . В тех случаях, когда теплообменом в результате теплопроводности и конвекции можно пренебречь по сравнению с лучистым теплообменом, температура излучающей поверхности полностью определяется значениями  $\epsilon_T$  и  $\alpha_s$  и может быть вычислена по формуле

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q}{\sigma} \frac{\alpha_s}{\epsilon_T}},$$



где  $Q$  — удельный тепловой поток солнечного излучения на границе земной атмосферы в направлении нормали к облучаемой поверхности ( $Q \approx 1400$  Вт/м<sup>2</sup>).

Если сравнивают энергетические светимости (или их спектральные плотности) реальных излучателей и черного тела не в пределах угла  $2\pi$ , а в направлении нормали к излучающей поверхности, то коэффициенты излучения обозначают  $\varepsilon_T^n$  и  $\varepsilon_\lambda^n$ .

Более подробные сведения по рассмотренным выше вопросам можно найти в специальной литературе:

[1—6] — по измерениям в области новой техники;

[7—9] — по поляризационным материалам;

[10—13] — по различным видам оптических излучателей;

[14, 15] — по измерениям при высоких температурах;

[16] — по теории отражения света;

[17] — по оптическим свойствам металлов.

Следует рекомендовать также специальные справочники, содержащие дополнительные сведения по оптическим свойствам веществ, в частности [17—24]

В табл. 31.1—31.76 приведены оптические характеристики для различных материалов и веществ.

## 31.2. ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

Таблица 31.1. Оптические характеристики кроновых стекол [25]

| Характеристика                                                   | Марка стекла |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------------------------------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                                                  | ЛК6          | ЛК7      | К8       | БК6      | БК8      | БК10     | ТК2      | ТК14     | ТК16     | ТК20     | КФ4      |
| $n_{\text{осн}}^{*1}$                                            | 1,472142     | 1,484608 | 1,518294 | 1,542136 | 1,548861 | 1,571309 | 1,574860 | 1,615506 | 1,615192 | 1,624702 | 1,520270 |
| $\nu_{\text{осн}}$                                               | 66,64        | 66,17    | 63,87    | 59,40    | 62,56    | 55,77    | 57,20    | 60,33    | 58,08    | 56,43    | 58,71    |
| $n$ для длины волны лазера, нм:                                  |              |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 488,0                                                            | 1,47521      | 1,48777  | 1,52181  | 1,54612  | 1,55268  | 1,57580  | 1,57926  | 1,61996  | 1,61983  | 1,62955  | 1,52413  |
| 514,0                                                            | 1,47371      | 1,48622  | 1,52009  | 1,54417  | 1,55081  | 1,57359  | 1,57710  | 1,61778  | 1,61756  | 1,62717  | 1,52224  |
| 520,8                                                            | 1,47336      | 1,48586  | 1,51968  | 1,54371  | 1,55037  | 1,57307  | 1,57659  | 1,61726  | 1,61702  | 1,62661  | 1,52179  |
| 530,0                                                            | 1,47290      | 1,48538  | 1,51916  | 1,54311  | 1,54979  | 1,57240  | 1,57593  | 1,61659  | 1,61633  | 1,62589  | 1,52121  |
| 568,2                                                            | 1,47121      | 1,48363  | 1,51722  | 1,54093  | 1,54770  | 1,56995  | 1,57353  | 1,61416  | 1,61379  | 1,62324  | 1,51910  |
| 632,8                                                            | 1,46897      | 1,48131  | 1,51466  | 1,53807  | 1,54494  | 1,56676  | 1,57040  | 1,61096  | 1,61048  | 1,61979  | 1,51632  |
| 647,1                                                            | 1,46855      | 1,48088  | 1,51419  | 1,53755  | 1,54442  | 1,56618  | 1,56982  | 1,61037  | 1,60987  | 1,61916  | 1,51581  |
| 694,3                                                            | 1,46732      | 1,47960  | 1,51279  | 1,53600  | 1,54292  | 1,56448  | 1,56814  | 1,60864  | 1,60810  | 1,61732  | 1,51431  |
| 890,0                                                            | 1,46371      | 1,47585  | 1,50872  | 1,53170  | 1,53861  | 1,55974  | 1,56346  | 1,60375  | 1,60313  | 1,61219  | 1,51002  |
| 1060,0                                                           | 1,46146      | 1,47352  | 1,50625  | 1,52920  | 1,53604  | 1,55709  | 1,56081  | 1,60090  | 1,60032  | 1,60932  | 1,50748  |
| $\beta_{\text{осн}}$ , $10^{-7}$ 1/К, в интервале температур, К: |              |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| от 213 до 293                                                    | —22          | +36      | +6       | —        | +16      | +19      | +15      | — 1,0    | + 0,7    | + 2      | +18,4    |
| от 293 до 393                                                    | — 7          | +52      | +21      | —        | +32      | +35      | +30      | +11,6    | +15,8    | +15      | +34,0    |
| $\tau_\lambda^*$ ( $\lambda = 560$ нм)                           |              |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| для $d$ , мм:                                                    |              |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 10                                                               | 0,993        | 0,991    | 0,996    | 0,996    | 0,995    | 0,996    | 0,995    | 0,996    | 0,996    | 0,996    | 0,996    |
| 100                                                              | 0,932        | 0,917    | 0,958    | 0,958    | 0,956    | 0,957    | 0,953    | 0,958    | 0,962    | 0,957    | 0,959    |
| $\lambda_{\text{min}}$ , нм                                      | 321          | 318      | 320      | 322      | 325      | 336      | 318      | 346      | 347      | 347      | 327      |
| $B$ , $10^{-12}$ Па <sup>-1</sup> , для $\lambda = 0,55$ мкм     | 3,70         | 3,45     | 3,20     | 2,60     | 2,80     | 2,90     | 2,70     | 1,80     | 1,80     | 1,85     | 2,90     |

\*1 Здесь и далее значения показателей преломления приведены с погрешностью  $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ .

Таблица 31.2. Оптические характеристики флинтowych стекол [25]

| Характеристика                                                           | Марка стекла |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                                                          | БФ12         | БФ16     | БФ24     | ЛФ5      | Ф1       | Ф6       | ТФ1      | ТФ3      | ТФ5      |
| $n_{\text{осн}}$                                                         | 1,629837     | 1,674385 | 1,638639 | 1,578326 | 1,616878 | 1,607015 | 1,652188 | 1,723166 | 1,761712 |
| $\gamma_{\text{осн}}$                                                    | 38,82        | 47,00    | 36,50    | 41,03    | 36,69    | 37,68    | 33,62    | 29,29    | 27,32    |
| $n$ для длины волны ла-зера, нм:                                         |              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 488,0                                                                    | 1,63705      | 1,68073  | 1,64643  | 1,58457  | 1,62436  | 1,61417  | 1,66085  | 1,73425  | 1,77426  |
| 514,0                                                                    | 1,63348      | 1,67761  | 1,64258  | 1,58149  | 1,62066  | 1,61063  | 1,65656  | 1,728774 | 1,76802  |
| 520,8                                                                    | 1,63265      | 1,67688  | 1,64168  | 1,58076  | 1,61979  | 1,60980  | 1,65555  | 1,72745  | 1,76657  |
| 530,0                                                                    | 1,63157      | 1,67593  | 1,64052  | 1,57983  | 1,61868  | 1,60873  | 1,65427  | 1,72581  | 1,76470  |
| 568,2                                                                    | 1,62770      | 1,67250  | 1,63634  | 1,57647  | 1,61467  | 1,60489  | 1,64964  | 1,71992  | 1,75806  |
| 632,8                                                                    | 1,62276      | 1,66809  | 1,63103  | 1,57215  | 1,60955  | 1,59998  | 1,64378  | 1,71250  | 1,74971  |
| 647,1                                                                    | 1,62187      | 1,66728  | 1,63007  | 1,57137  | 1,60863  | 1,59910  | 1,64272  | 1,71117  | 1,74822  |
| 694,3                                                                    | 1,61930      | 1,66496  | 1,62732  | 1,56912  | 1,60597  | 1,59655  | 1,63970  | 1,70738  | 1,74397  |
| 890,0                                                                    | 1,61247      | 1,65864  | 1,62000  | 1,56303  | 1,59889  | 1,58973  | 1,63172  | 1,69751  | 1,73299  |
| 1060,0                                                                   | 1,60894      | 1,65527  | 1,61623  | 1,55979  | 1,59522  | 1,58616  | 1,62767  | 1,69263  | 1,72765  |
| $\beta_{\text{осн}}$ , $10^{-7}$ К $^{-1}$ , в интер-вале температур, К: |              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| от 213 до 293                                                            | +12,6        | +6       | +35      | +25,4    | +30,6    | +30      | +18,4    | +49      | +62,0    |
| от 293 до 393                                                            | +30,5        | +24      | +56      | +44,7    | +52,5    | +49      | +42,4    | +72      | +89,0    |
| $\gamma_{\lambda}$ ( $\lambda = 560$ нм) для $d$ , мм:                   |              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 10                                                                       | 0,996        | 0,996    | 0,995    | 0,995    | 0,996    | 0,995    | 0,996    | 0,996    | 0,996    |
| 100                                                                      | 0,959        | 0,963    | 0,954    | 0,954    | 0,960    | 0,953    | 0,962    | 0,960    | 0,960    |
| $\lambda_{\text{min}}$ , нм                                              | 347          | 362      | 364      | 335      | 346      | 343      | 355      | 372      | 385      |
| $B$ , $10^{-12}$ Па $^{-1}$ , для $\lambda = 0,55$ мкм                   | 2,50         | 1,60     | 2,60     | 3,20     | 2,90     | 2,95     | 2,50     | 1,80     | 1,45     |

Таблица 31.3. Коэффициенты формулы дисперсии кроиновых стекол [25]

| $A_i^{*1}$     | Марка стекла |             |            |            |            |
|----------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|
|                | ЛК6          | ЛК7         | К8         | БК8        | БК10       |
| $A_1$          | 2,1391711    | 2,1732195   | 2,2699804  | 2,3601309  | 2,4193499  |
| $A_2, 10^{-3}$ | -9,8913489   | -9,4960367  | -9,8250605 | -10,118581 | -7,6662143 |
| $A_3, 10^{-3}$ | 8,4704778    | 9,7105457   | 11,017203  | 11,761749  | 15,535897  |
| $A_4, 10^{-4}$ | 2,8247761    | 1,0540599   | 0,76606834 | 2,4663544  | -1,8549105 |
| $A_5, 10^{-5}$ | -1,9072939   | -0,38188276 | 1,1616952  | -1,2819625 | 6,0646835  |
| $A_6, 10^{-7}$ | 9,3359448    | 5,0116854   | 5,8130900  | 9,3405641  | -27,567697 |

Продолжение табл. 31.3

| $A_i^{*1}$     | Марка стекла |            |            |            |            |
|----------------|--------------|------------|------------|------------|------------|
|                | ТК2          | ТК14       | ГК16       | ТК20       | КФ4        |
| $A_1$          | 2,4321820    | 2,5615496  | 2,559113   | 2,5854315  | 2,2723952  |
| $A_2, 10^{-3}$ | -8,2232823   | -10,649249 | -9,8827859 | -9,0796080 | -9,3640165 |
| $A_3, 10^{-3}$ | 14,772427    | 14,719854  | 14,212686  | 16,291552  | 11,794006  |
| $A_4, 10^{-4}$ | -0,17487909  | 1,6374569  | 5,9116562  | 1,7763493  | 1,7956625  |
| $A_5, 10^{-5}$ | 3,4620141    | 0,77935463 | -5,4050675 | 0,85249807 | 120,49614  |
| $A_6, 10^{-7}$ | -14,790076   | -1,1965516 | 32,017380  | 0,25484363 | 3,8219544  |

\*1 Расчет показателей преломления с помощью коэффициентов формулы дисперсии обеспечивает погрешность в определении  $n$ , не превышающую  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ .

Таблица 31.4. Коэффициенты формулы дисперсии флиитовых стекол [25]

| $A_i^{*1}$     | Марка стекла |            |            |            |
|----------------|--------------|------------|------------|------------|
|                | БФ12         | БФ16       | БФ24       | ЛФ5        |
| $A_1$          | 2,5767076    | 2,7308360  | 2,6051551  | 2,4246429  |
| $A_2, 10^{-3}$ | -7,6835879   | -9,2896392 | -10,884034 | -7,9511272 |
| $A_3, 10^{-3}$ | 22,692139    | 21,405060  | 20,201021  | 19,033590  |
| $A_4, 10^{-4}$ | 4,1937275    | 2,3934677  | 17,331740  | 3,9095360  |
| $A_5, 10^{-5}$ | 2,4633519    | 2,7482465  | -14,260022 | 1,0184703  |
| $A_6, 10^{-7}$ | 17,499673    | 2,8808684  | 108,42795  | 17,896964  |

Продолжение табл. 31.4

| $A_i^{*1}$     | Марка стекла  |            |            |            |            |
|----------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
|                | Ф1            | Ф6         | ТФ1        | ТФ3        | ТФ5        |
| $A_1$          | 2,5344898     | 2,5047749  | 2,6349371  | 2,8433701  | 2,9580175  |
| $A_2, 10^{-3}$ | -8,9233727    | -7,8584593 | -8,5077204 | -8,5219322 | -8,2686725 |
| $A_3, 10^{-3}$ | 22,149725     | 22,129689  | 26,185673  | 33,994123  | 39,383391  |
| $A_4, 10^{-4}$ | 6,9286357     | 4,2000253  | 7,5510993  | 12,311168  | 12,219807  |
| $A_5, 10^{-5}$ | -0,0061831815 | 2,3483839  | 1,5001867  | -1,4893638 | 3,1433368  |
| $A_6, 10^{-7}$ | 30,937650     | 18,712023  | 36,330948  | 93,877638  | 86,507903  |

\*1 Расчет показателей преломления с помощью коэффициентов формулы дисперсии обеспечивает погрешность в определении  $n$ , не превышающую  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ .

Таблица 31.5. Границы и спектральные коэффициенты внутреннего пропускания кварцевых стекол [25]

| Характеристика                    | Марка стекла |       |       |       |       |
|-----------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                                   | КУ1          | КУ2   | КВ    | КВ-Р  | КИ    |
| $\lambda_{\min}$ , нм             | 180          | 180   | 230   | 220   | 240   |
| $\lambda_{\max}$ , нм             | 2600         | 2200  | 2200  | 2200  | 2800  |
| $\tau_{\lambda}^*$ ( $d = 10$ мм) |              |       |       |       |       |
| для $\lambda$ , нм:               |              |       |       |       |       |
| 180                               | 0,850        | 0,490 | —     | —     | —     |
| 190                               | 0,885        | 0,615 | —     | —     | —     |
| 200                               | 0,900        | 0,745 | —     | —     | —     |
| 210                               | 0,930        | 0,860 | 0,030 | 0,260 | 0,075 |
| 220                               | 0,960        | 0,930 | 0,220 | 0,550 | 0,220 |
| 230                               | 0,960        | 0,925 | 0,565 | 0,800 | 0,435 |
| 240                               | 0,950        | 0,905 | 0,540 | 0,800 | 0,525 |
| 250                               | 0,970        | 0,920 | 0,715 | 0,865 | 0,585 |
| 260                               | 0,999        | 0,975 | 0,920 | 0,940 | 0,800 |
| 270                               | 0,999        | 0,995 | 0,995 | 0,965 | 0,930 |
| 280                               | 0,999        | 0,999 | 0,999 | 0,985 | 0,975 |
| 300—2000                          | 0,999        | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |
| 2200                              | 0,915        | 0,915 | 0,915 | 0,915 | 0,999 |
| 2400                              | 0,980        | —     | —     | —     | 0,999 |
| 2600                              | 0,800        | —     | —     | —     | 0,999 |
| 2700                              | 0,070        | —     | —     | —     | 0,999 |
| 2800                              | —            | —     | —     | —     | 0,999 |

Таблица 31.6. Показатели преломления, основной коэффициент дисперсии, коэффициенты формулы дисперсии и оптический коэффициент напряжения кварцевых стекол КУ1, КУ2, КВ, КВ-Р, КИ [25]

| Характеристика                                                          | Численное значение |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $n_{\text{осн}}$                                                        | 1,460078           |
| $\nu_{\text{осн}}$                                                      | 68,00              |
| $n$ для длины волны лазера, нм:                                         |                    |
| 488,0                                                                   | 1,46299            |
| 514,0                                                                   | 1,46157            |
| 520,8                                                                   | 1,46123            |
| 530,0                                                                   | 1,46079            |
| 568,2                                                                   | 1,45918            |
| 632,8                                                                   | 1,45702            |
| 647,1                                                                   | 1,45662            |
| 694,3                                                                   | 1,45543            |
| 890,0                                                                   | 1,45190            |
| 1060,0                                                                  | 1,44968            |
| $A_1$                                                                   | 2,1026513          |
| $A_2, 10^{-3}$                                                          | -8,5943075         |
| $A_3, 10^{-3}$                                                          | 9,8576238          |
| $A_4, 10^{-4}$                                                          | -4,4538022         |
| $A_5, 10^{-5}$                                                          | 4,4589827          |
| $A_6, 10^{-6}$                                                          | -1,9692608         |
| $B, 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ , для $\lambda =$<br>$= 0,55 \text{ мкм}$ | 3,45               |

Таблица 31.7. Оптические характеристики стекол для волоконной оптики и ситаллов [25]

 $(\lambda_1 = 486,13 \text{ нм}; \lambda_2 = 656,27 \text{ нм})$ 

| Характеристика                                                     | Стекла для сердцевины |        |        |        | Стекла для оболочки |        | Ситаллы |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|---------------------|--------|---------|-------|-------|
|                                                                    | ТК16                  | ФВ     | ВС586  | ВС682  | ВО488               | ВО513  | СО21    | СО115 | СО156 |
| $n_{\text{осн}}$                                                   | 1,6152                | 1,6291 | 1,5893 | 1,6855 | 1,4898              | 1,5150 | 1,553   | 1,535 | 1,545 |
| $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}, 10^{-5}$                           | 1050                  | 1757   | 1422   | 1298   | 745                 | 795    | 1080    | 1020  | 1040  |
| $\lambda_{\text{min}}, \text{ нм}$                                 | 323                   | 334    | 332    | 325    | 300                 | 310    | —       | —     | —     |
| $\tau_{\lambda}^w (d = 10 \text{ мм})$ для $\lambda, \text{ нм}$ : |                       |        |        |        |                     |        |         |       |       |
| 400                                                                | 0,992                 | 0,996  | 0,997  | 0,992  | 0,997               | 0,994  | —       | —     | —     |
| 600                                                                | 0,998                 | 0,999  | 0,999  | 0,999  | 0,999               | 0,996  | —       | —     | —     |
| 800                                                                | 0,997                 | 0,999  | 0,999  | 0,999  | 0,999               | 0,997  | —       | —     | —     |
| 1000                                                               | 0,991                 | 0,999  | 0,999  | 0,999  | 0,999               | 0,997  | —       | —     | —     |

Таблица 31.8. Значения спектрального коэффициента диффузного отражения  $\rho_{\lambda \text{ диф}}$  светорассеивающих оптических материалов при температуре 295—300 К [26]

| $\lambda$ , нм | Молочное стекло           |         |                           |         | Окись магния |                             | Сульфат бария<br>(прессованный<br>порошок BaSO <sub>4</sub> ) |
|----------------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|--------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                | МС 14                     |         | МС 20                     |         | копоть MgO   | прессованный<br>порошок MgO |                                                               |
|                | зеркально<br>полированное | матовое | зеркально<br>полированное | матовое |              |                             |                                                               |
| 400            | 0,915                     | 0,892   | 0,935                     | 0,950   | 0,977        | 0,972                       | 0,987                                                         |
| 420            | —                         | —       | 0,940                     | 0,950   | —            | —                           | —                                                             |
| 440            | —                         | —       | 0,945                     | 0,957   | —            | —                           | —                                                             |
| 450            | 0,945                     | 0,925   | —                         | —       | 0,980        | 0,980                       | —                                                             |
| 460            | —                         | —       | 0,955                     | 0,960   | 0,980        | —                           | 0,991                                                         |
| 480            | —                         | —       | 0,960                     | 0,966   | 0,980        | —                           | —                                                             |
| 490            | —                         | —       | —                         | —       | 0,980        | —                           | —                                                             |
| 500            | 0,958                     | 0,942   | 0,965                     | 0,969   | 0,980        | 0,983                       | 0,991                                                         |
| 520            | —                         | —       | 0,970                     | 0,974   | 0,980        | —                           | —                                                             |
| 540            | —                         | —       | 0,970                     | 0,975   | 0,980        | —                           | —                                                             |
| 550            | 0,956                     | 0,945   | 0,970                     | 0,975   | 0,980        | 0,984                       | —                                                             |
| 560            | 0,956                     | 0,945   | 0,970                     | 0,975   | 0,980        | —                           | 0,992                                                         |
| 570            | 0,956                     | 0,945   | 0,970                     | 0,975   | 0,980        | —                           | 0,992                                                         |
| 580            | 0,956                     | 0,945   | 0,970                     | 0,975   | 0,980        | —                           | 0,992                                                         |
| 600            | 0,955                     | 0,945   | 0,970                     | 0,973   | 0,980        | 0,988                       | 0,992                                                         |
| 620            | 0,955                     | 0,945   | 0,970                     | 0,974   | 0,980        | —                           | 0,992                                                         |
| 640            | 0,955                     | 0,945   | 0,965                     | 0,973   | 0,979        | —                           | 0,992                                                         |
| 650            | 0,955                     | 0,945   | 0,965                     | 0,975   | 0,979        | 0,990                       | 0,992                                                         |
| 660            | 0,955                     | 0,945   | 0,965                     | 0,975   | 0,978        | 0,990                       | 0,992                                                         |
| 680            | 0,955                     | 0,945   | 0,965                     | 0,971   | 0,978        | 0,990                       | 0,992                                                         |
| 700            | 0,955                     | 0,945   | 0,965                     | 0,970   | 0,977        | 0,990                       | 0,992                                                         |
| 720            | 0,955                     | 0,945   | 0,965                     | 0,971   | 0,977        | —                           | 0,992                                                         |
| 740            | 0,955                     | 0,945   | 0,965                     | 0,971   | 0,976        | —                           | 0,992                                                         |
| 750            | 0,955                     | 0,945   | 0,960                     | —       | 0,975        | —                           | 0,992                                                         |
| 1000           | —                         | —       | 0,935                     | —       | —            | —                           | 0,990                                                         |

Примечание: Погрешность измерения не превышает  $\pm 1\%$ .

Таблица 31.9. Спектральный показатель поглощения и показатель преломления цветного стекла различных марок [27]

| $\lambda$ , нм              | $d_L$ , мм <sup>-1</sup> , для стекол марок |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | УФС1                                        | УФС6  | ФС6   | СС2   | СС4   | СЗС7  | СЗС22 | СЗС24 | ЗС11  | ЖЗС6  | ЖЗС12 | ЖЗС17 | ОС5   | ИКС6  | НС1   | НС2   | НС8   | НС10  | ТС10  |
| 240                         | 0,32                                        | >3    | —     | >3    | >3    | >3    | >3    | —     | —     | >3    | >3    | >3    | >3    | —     | >3    | >3    | >3    | >3    | >3    |
| 280                         | 0,025                                       | 1,74  | 0,57  | 2,73  | >3    | >3    | >3    | 0,40  | —     | >3    | >3    | >3    | >3    | —     | >3    | >3    | >3    | >3    | >3    |
| 320                         | 0,004                                       | 0,13  | 0,084 | 0,15  | 0,68  | 0,75  | >3    | 0,041 | —     | 1,05  | >3    | >3    | 1,77  | —     | 0,95  | >3    | >3    | >3    | >3    |
| 350                         | 0,005                                       | 0,035 | 0,032 | 0,040 | 0,16  | 0,086 | >3    | 0,009 | —     | >3    | >3    | >3    | 1,24  | —     | 0,10  | 0,29  | 0,75  | 2,30  | 0,41  |
| 380                         | 0,035                                       | 0,104 | 0,023 | 0,015 | 0,050 | 0,026 | 0,046 | 0,004 | 4,80  | >3    | >3    | >3    | 1,17  | —     | 0,011 | 0,080 | 0,44  | 1,32  | 0,15  |
| 420                         | 0,72                                        | >3    | 0,082 | 0,010 | 0,055 | 0,011 | 0,009 | 0,011 | 1,95  | 1,21  | >3    | >3    | 1,16  | —     | 0,050 | 0,14  | 0,29  | 0,93  | 0,43  |
| 450                         | 1,07                                        | >3    | 0,30  | 0,025 | 0,15  | 0,009 | 0,007 | 0,011 | 0,77  | 0,49  | 2,33  | >3    | 0,90  | —     | 0,081 | 0,29  | 0,27  | 0,87  | 0,67  |
| 480                         | 1,33                                        | >3    | 0,95  | 0,079 | 0,49  | 0,010 | 0,007 | 0,009 | 0,33  | 0,18  | 1,27  | 2,32  | 0,61  | —     | 0,073 | 0,24  | 0,26  | 0,85  | 0,52  |
| 520                         | 2,30                                        | >3    | 1,75  | 0,24  | 1,34  | 0,034 | 0,028 | 0,010 | 0,15  | 0,056 | 0,66  | 1,50  | 0,36  | —     | 0,071 | 0,23  | 0,27  | 0,87  | 0,39  |
| 550                         | 2,50                                        | >3    | 1,55  | 0,22  | 1,27  | 0,079 | 0,12  | 0,010 | 0,21  | 0,038 | 0,62  | 1,43  | 0,23  | —     | 0,070 | 0,22  | 0,26  | 0,85  | 0,37  |
| 580                         | 3,50                                        | >3    | 2,20  | 0,33  | 1,86  | 0,15  | 0,37  | 0,013 | 0,42  | 0,050 | 0,80  | 1,55  | 0,15  | —     | 0,072 | 0,23  | 0,27  | 0,88  | 0,31  |
| 620                         | 3,00                                        | >3    | 3,10  | 0,37  | 2,10  | 0,28  | 1,09  | 0,028 | 0,84  | 0,094 | 1,35  | 2,13  | 0,10  | —     | 0,079 | 0,25  | 0,27  | 0,87  | 0,33  |
| 650                         | 1,75                                        | >3    | 3,40  | 0,38  | 2,10  | 0,39  | 1,99  | 0,047 | 1,12  | 0,11  | 1,66  | 2,43  | 0,080 | 5,70  | 0,076 | 0,25  | 0,27  | 0,86  | 0,29  |
| 680                         | 0,36                                        | 2,92  | 2,70  | 0,18  | 1,01  | 0,48  | >3    | 0,072 | 1,29  | 0,092 | 1,69  | 2,18  | 0,070 | 4,90  | 0,043 | 0,13  | 0,26  | 0,81  | 0,15  |
| 720                         | 0,080                                       | 0,41  | 0,43  | 0,009 | 0,049 | 0,57  | >3    | 0,12  | 1,41  | 0,070 | 1,69  | 1,88  | 0,063 | 3,70  | 0,030 | 0,070 | 0,25  | 0,73  | 0,10  |
| 750                         | 0,11                                        | 0,30  | 0,067 | —     | 0,008 | 0,61  | >3    | 0,16  | 1,42  | 0,050 | 1,63  | 1,79  | 0,060 | 2,75  | 0,020 | 0,060 | 0,26  | 0,74  | 0,12  |
| 780                         | 0,15                                        | 0,47  | 0,014 | —     | 0,005 | 0,62  | >3    | 0,22  | 1,43  | 0,029 | 1,59  | 1,87  | 0,060 | 2,00  | 0,024 | 0,065 | 0,29  | 0,79  | 0,12  |
| 840                         | 0,22                                        | 0,78  | 0,014 | —     | 0,008 | 0,60  | >3    | 0,34  | 1,39  | 0,014 | 1,52  | 1,84  | 0,060 | 0,99  | 0,038 | 0,095 | 0,35  | 0,87  | 0,21  |
| 920                         | 0,26                                        | 0,94  | 0,029 | 0,002 | 0,016 | 0,50  | >3    | 0,54  | 1,22  | 0,010 | 1,38  | 1,64  | 0,060 | 0,32  | 0,044 | 0,11  | 0,42  | 0,98  | 0,26  |
| 1000                        | 0,23                                        | 0,99  | 0,064 | 0,005 | 0,037 | 0,39  | >3    | 0,75  | 0,99  | 0,010 | 1,20  | 1,48  | 0,060 | 0,11  | 0,050 | 0,12  | 0,49  | 1,10  | 0,28  |
| 1200                        | 0,40                                        | 1,51  | 0,38  | 0,050 | 0,27  | 0,21  | >3    | 0,96  | 0,50  | 0,010 | 0,73  | 0,96  | 0,056 | 0,022 | 0,040 | 0,13  | 0,51  | 1,06  | 0,27  |
| 1400                        | 0,49                                        | 1,41  | 0,55  | 0,047 | 0,36  | 0,11  | 2,05  | 1,01  | 0,41  | 0,010 | 0,44  | 0,60  | 0,050 | 0,017 | 0,040 | 0,10  | 0,36  | 0,71  | 0,20  |
| 1800                        | 0,43                                        | 1,58  | 0,53  | 0,043 | 0,37  | 0,028 | 0,45  | 0,70  | 0,22  | 0,010 | 0,22  | 0,42  | 0,032 | 0,009 | 0,040 | 0,090 | 0,24  | 0,46  | 0,18  |
| 2460                        | 0,23                                        | 1,84  | 0,17  | —     | 0,048 | 0,006 | 0,15  | 0,68  | 0,080 | 0,010 | 0,16  | 0,35  | 0,030 | 0,013 | 0,040 | 0,080 | 0,15  | 0,26  | 0,15  |
| 3000                        | 1,10                                        | 0,53  | 0,37  | 0,13  | 0,24  | 0,11  | 1,93  | 0,77  | 0,11  | 0,11  | 0,21  | 0,55  | 0,15  | 0,090 | 0,13  | 0,22  | 0,62  | 0,63  | 0,23  |
| $n$ для $\lambda=589,29$ нм | 1,540                                       | 1,520 | 1,495 | 1,520 | 1,520 | 1,514 | 1,535 | 1,516 | 1,550 | 1,522 | 1,527 | 1,527 | 1,523 | 1,541 | 1,521 | 1,523 | 1,503 | 1,509 | 1,523 |

 $\lambda=589,29$  нм

### 31.3. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ, МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.10. Показатели преломления исландского шпата при температуре 291 К [28]

| $\lambda$ , нм | $n_o$   | $n_e$ (ГПП) |
|----------------|---------|-------------|
| 200            | 1,90284 | 1,57649     |
| 312            | 1,71425 | 1,51140     |
| 410            | 1,68014 | 1,49640     |
| 434            | 1,67552 | 1,49430     |
| 467            | 1,67024 | 1,49190     |
| 486            | 1,66785 | 1,49074     |
| 508            | 1,66527 | 1,48956     |
| 533            | 1,66277 | 1,48841     |
| 560            | 1,66046 | 1,48736     |
| 589            | 1,65835 | 1,48640     |
| 643            | 1,65504 | 1,48490     |
| 656            | 1,65437 | 1,48459     |
| 670            | 1,65367 | 1,48426     |
| 768            | 1,64974 | 1,48259     |
| 801            | 1,64869 | 1,48216     |
| 905            | 1,64578 | 1,48098     |
| 946            | 1,64480 | 1,48060     |
| 1042           | 1,64276 | 1,47985     |
| 1097           | 1,64167 | 1,47948     |
| 1159           | 1,64051 | 1,47910     |
| 1229           | 1,63926 | 1,47870     |

Таблица 31.11. Показатели преломления кристаллического кварца при температуре 291 К [21]

| $\lambda$ , нм | $n_o$   | $n_e$ (ГПП) |
|----------------|---------|-------------|
| 214            | 1,63039 | 1,64262     |
| 250            | 1,60032 | 1,61139     |
| 303            | 1,57695 | 1,58720     |
| 340            | 1,56747 | 1,57738     |
| 405            | 1,55716 | 1,56671     |
| 436            | 1,55379 | 1,56322     |
| 468            | 1,55103 | 1,56037     |
| 480            | 1,55012 | 1,55943     |
| 509            | 1,54823 | 1,55747     |
| 589            | 1,54425 | 1,55335     |
| 628            | 1,54282 | 1,55188     |
| 656            | 1,54190 | 1,55093     |
| 707            | 1,54049 | 1,54947     |
| 766            | 1,53907 | 1,54801     |
| 845            | 1,53752 | 1,54640     |
| 1000           | 1,53503 | 1,54381     |
| 1080           | 1,53387 | 1,54260     |
| 1400           | 1,52972 | 1,53826     |
| 1530           | 1,52800 | 1,53646     |
| 1600           | 1,52703 | 1,53545     |
| 1800           | 1,52413 | 1,53242     |
| 2172           | 1,51799 | 1,52609     |

Таблица 31.12. Удельный угол вращения плоскости поляризации кристаллического кварца при температуре 293 К [29]

| $\lambda$ , нм | $\phi_o$ , град/мм | $\lambda$ , нм | $\phi_o$ , град/мм |
|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 215            | 236,0              | 486            | 32,76              |
| 279            | 114,5              | 500            | 30,78              |
| 405            | 48,90              | 518            | 28,62              |
| 434            | 41,92              | 589            | 21,72              |
| 448            | 39,24              | 656            | 17,25              |

Таблица 31.13. Оптические характеристики бесцветной слюды (мусковит) при температуре 291 К [29]

| $\lambda$ , мкм | $n_G$ | $n_m$ | $n_p$ | $\tau_\lambda^*$ ( $d=0,03$ мм) |
|-----------------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| 0,589           | 1,594 | 1,590 | 1,561 | —                               |
| 1,0             | 1,593 | 1,586 | 1,554 | 0,98                            |
| 1,5             | 1,586 | 1,579 | 1,548 | 0,92                            |
| 2,0             | 1,575 | 1,572 | 1,544 | 0,98                            |
| 2,5             | 1,562 | 1,562 | 1,535 | 0,90                            |
| 3,0             | —     | —     | —     | 0,95                            |

Таблица 31.14. Относительная степень поляризации и спектральный коэффициент пропускания поляроидов [29]

Толщина анизотропной пленки в поляроидах 0,2 мм; погрешность измерения  $\pm 5\%$

| $\lambda$ , нм | Герпатитовый поляроид |                | Поливиниловый поляроид |                |
|----------------|-----------------------|----------------|------------------------|----------------|
|                | $P_\lambda$ , %       | $\tau_\lambda$ | $P_\lambda$ , %        | $\tau_\lambda$ |
| 400            | —                     | 0,02           | 100                    | 0,26           |
| 450            | —                     | 0,15           | 100                    | 0,37           |
| 500            | 98,7                  | 0,27           | 100                    | 0,40           |
| 550            | 99,0                  | 0,32           | 100                    | 0,37           |
| 600            | 99,0                  | 0,34           | 100                    | 0,35           |
| 650            | 98,5                  | 0,36           | 100                    | 0,38           |
| 700            | 98,2                  | 0,36           | 100                    | 0,42           |
| 750            | 91,5                  | 0,40           | 100                    | 0,45           |
| 800            | 67,8                  | 0,44           | 98                     | 0,50           |
| 850            | 41,2                  | 0,50           | 72                     | 0,59           |
| 900            | 28,2                  | 0,54           | 32                     | 0,80           |

Таблица 31.15. Показатели преломления натриевой селитры [29]

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$ (ГПП) |
|-----------------|--------|-------------|
| 0,434           | 1,6126 | 1,3404      |
| 0,486           | 1,5998 | 1,3384      |
| 0,501           | 1,5968 | 1,3379      |
| 0,546           | 1,5899 | 1,3365      |
| 0,578           | 1,5860 | 1,3363      |
| 0,589           | 1,5848 | 1,3360      |
| 0,656           | 1,5791 | 1,3347      |
| 0,668           | 1,5783 | 1,3345      |

Таблица 31.16. Постоянная Верде магнитооптических материалов при температуре от 293 до 300 К [13]

| Материал                                  | $\lambda$ , нм | $C_\lambda$ ,<br>10 <sup>-6</sup> угл. мин/(Тл·м) |
|-------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------|
| Арсенид галлия                            | 1060           | 0,30                                              |
| Бензин                                    | 589,3          | 0,297                                             |
| Вода                                      | 486,0          | 0,0190                                            |
|                                           | 589,3          | 0,0131                                            |
| Железо-иттриевый гранат                   | 632,8          | 85                                                |
|                                           | 1000—2000      | 300                                               |
| Иодистый литий                            | 632,8          | 0,0823                                            |
| Кварц кристаллический<br>(1 с)            | 589,3          | 0,0166                                            |
| Кварц плавленый                           | 437            | 0,0283                                            |
|                                           | 486            | 0,0223                                            |
|                                           | 548            | 0,0172                                            |
|                                           | 633            | 0,0130                                            |
| Кремний                                   | 1300           | 0,10                                              |
| Сернистый кадмий                          | 632,8          | 0,33                                              |
| Сернистый цинк                            | 666,0          | 0,234                                             |
| Сероуглерод                               | 486,0          | 0,0670                                            |
|                                           | 589,3          | 0,0420                                            |
| Спирт метиловый                           | 589,3          | 0,00944                                           |
| Спирт этиловый                            | 589,3          | 0,0111                                            |
| Стекло бескислородное:<br>ИКС22           | 1150           | 0,087                                             |
|                                           | 3390           | 0,005                                             |
| ИКС23                                     | 1150           | 0,052                                             |
|                                           | 3390           | 0,006                                             |
| ИКС24                                     | 1150           | 0,120                                             |
|                                           | 3390           | 0,005                                             |
| ИКС25                                     | 1150           | 0,135                                             |
|                                           | 3390           | 0,010                                             |
| ИКС26                                     | 1150           | 0,066                                             |
|                                           | 3390           | 0,006                                             |
| ИКС28                                     | 1150           | 0,095                                             |
|                                           | 3390           | 0,015                                             |
| ИКС29                                     | 1150           | 0,097                                             |
|                                           | 3390           | 0,011                                             |
| ИКС30                                     | 1150           | 0,085                                             |
|                                           | 3390           | 0,014                                             |
| ИКС31                                     | 1150           | 0,100                                             |
|                                           | 3390           | 0,009                                             |
| ИКС32                                     | 3390           | 0,014                                             |
| Стекло                                    | 1100           | 0,065                                             |
| As — S (20% TeO <sub>2</sub> )            |                |                                                   |
| Стекло Ge <sup>3+</sup> — P <sup>3+</sup> | 500            | —0,326                                            |
| Стекло PbSi                               | 632            | 0,053                                             |
|                                           | 700            | 0,071                                             |
|                                           | 1000           | 0,032                                             |
| Стекло P <sup>3+</sup>                    | 670            | —0,243                                            |
| Стекло оптическое бес-<br>цветное:        |                |                                                   |
| ЛК7                                       | 589            | 0,016                                             |
| К8                                        | 589            | 0,017                                             |
| БК6                                       | 589            | 0,019                                             |
| БК8                                       | 589            | 0,018                                             |
| БК10                                      | 589            | 0,020                                             |
| ТК2                                       | 589            | 0,019                                             |
| ТК14                                      | 589            | 0,018                                             |
| ТК16                                      | 589            | 0,019                                             |
| ТК20                                      | 589            | 0,020                                             |
| КФ4                                       | 589            | 0,019                                             |
| БФ12                                      | 589            | 0,034                                             |
| БФ16                                      | 589            | 0,026                                             |
| БФ24                                      | 589            | 0,039                                             |
| ЛФ5                                       | 589            | 0,032                                             |
| Ф1                                        | 589            | 0,038                                             |
| Ф6                                        | 589            | 0,037                                             |

Продолжение табл. 31.16

| Материал           | $\lambda$ , нм | $C_\lambda$ ,<br>10 <sup>-6</sup> угл. мин/(Тл·м) |
|--------------------|----------------|---------------------------------------------------|
| ТФ1                | 589            | 0,044                                             |
| Сурьмянистый индий | 15 000         | 12                                                |
| Фторид европия     | 600            | —1,0                                              |

\*1 Для левовращающих материалов  $C_\lambda < 0$ .

Таблица 31.17. Постоянная Керра жидких и газообразных электрооптических материалов [30]

| Вещество                      | $\lambda$ , нм | $T$ , К | $B_\lambda$ , м/В <sup>2</sup> |
|-------------------------------|----------------|---------|--------------------------------|
| Азот                          | 546            | 330     | $4,44 \cdot 10^{-16}$          |
| Бензол                        | 546            | 293     | $5,56 \cdot 10^{-15}$          |
| Вода                          | 546            | 293     | $5,55 \cdot 10^{-14}$          |
| Карбосульфид паробраз-<br>ный | 546            | 293     | $4,0 \cdot 10^{-16}$           |
| Монобромнафталин              | 639            | 293     | $1,01 \cdot 10^{-13}$          |
| Нитробензол жидкий            | 500            | 293     | $5,5 \cdot 10^{-12}$           |
| То же                         | 525            | 293     | $5,2 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 550            | 293     | $5,0 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 575            | 293     | $4,5 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 600            | 293     | $4,3 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 625            | 293     | $4,1 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 650            | 293     | $4,0 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 675            | 293     | $3,7 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 700            | 293     | $3,6 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 750            | 293     | $3,5 \cdot 10^{-12}$           |
| »                             | 800            | 293     | $3,4 \cdot 10^{-12}$           |
| Нитробензол паробраз-<br>ный  | 546            | 330     | $3,0 \cdot 10^{-16}$           |
| Нитротолуол                   | 639            | 293     | $1,4 \cdot 10^{-12}$           |
| Сероуглерод                   | 546            | 293     | $3,89 \cdot 10^{-14}$          |
| Сероуглерод паробраз-<br>ный  | 546            | 293     | $4,0 \cdot 10^{-17}$           |
| Хлорбензол                    | 546            | 293     | $1,11 \cdot 10^{-13}$          |

Таблица 31.18. Электрооптический коэффициент и показатель преломления кристаллических электрооптических материалов при температуре 293 К и длине волны 546 нм [31]

| Материал                | $r_{63}^*$ ,<br>10 <sup>-12</sup> м/В | $n_o$ | $n_e$ (ГПП) |
|-------------------------|---------------------------------------|-------|-------------|
| Дигидроарсенат калия    | 10,9                                  | 1,520 | 1,570       |
| Дигидроарсенат рубидия  | 13,0                                  | 1,520 | 1,560       |
| Дигидрофосфат аммония   | 5,5                                   | 1,526 | 1,480       |
| Дигидрофосфат калия     | 9,7                                   | 1,510 | 1,468       |
| Дидейтерофосфат аммония | 8,0                                   | 1,519 | 1,476       |
| Дидейтерофосфат калия   | 26,4                                  | 1,510 | 1,470       |

Таблица 31.19. Спектральный коэффициент пропускания дигидрофосфата аммония толщиной 1 мм при температуре 293 К [32]

| $\lambda$ , нм | $\tau_{\lambda 1}$ | $\lambda$ , нм | $\tau_{\lambda 1}$ |
|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 200            | 0,62               | 800            | 0,95               |
| 300            | 0,77               | 900            | 0,94               |
| 400            | 0,83               | 1000           | 0,90               |
| 500            | 0,88               | 1100           | 0,80               |
| 600            | 0,92               | 1200           | 0,60               |
| 700            | 0,96               | 1300           | 0,20               |

### 31.4. ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ И ОПТИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА

Таблица 31.20. Спектральный коэффициент внутреннего пропускания  $\tau_{\lambda 1}^*$  оптических кристаллов толщиной  
1 мм при температуре 293 К для луча обыкновенного  
Образцы — полированные диски. Погрешность измерения  $\pm 5\%$

| $\lambda$ , мкм | AgCl<br>[21] | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *1<br>[21] | BaF <sub>2</sub><br>[21] | CaF <sub>2</sub><br>[21] | CsI<br>[33] | CuBr<br>[21] | CuCl<br>[21] | Ge<br>[21] | KBr<br>[34] | KCl<br>[21] | KRS-5<br>[35] | LiF<br>[36] | NaCl<br>[19] | NaF<br>[21] |
|-----------------|--------------|-------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|--------------|--------------|------------|-------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
| 1,0             | —            | 0,870                                     | 0,996                    | 0,997                    | 0,984       | —            | 0,878        | —          | 0,991       | 0,995       | 0,819         | 0,919       | 0,940        | —           |
| 2,0             | 0,944        | 0,900                                     | 0,996                    | 0,994                    | 0,984       | 0,885        | 0,932        | 0,548      | 0,991       | 0,995       | 0,841         | 0,919       | 0,950        | —           |
| 3,0             | 0,949        | 0,910                                     | 0,996                    | 0,993                    | 0,984       | 0,914        | 0,932        | 0,700      | 0,991       | 0,994       | 0,846         | 0,926       | 0,950        | —           |
| 4,0             | 0,952        | 0,870                                     | 0,996                    | 0,991                    | 0,981       | 0,914        | 0,939        | 0,707      | 0,991       | 0,991       | 0,846         | 0,933       | 0,940        | —           |
| 5,0             | 0,954        | 0,770                                     | 0,996                    | 0,991                    | 0,981       | 0,914        | 0,939        | 0,714      | 0,991       | 0,992       | 0,846         | 0,940       | 0,590        | —           |
| 6,0             | 0,956        | 0,520                                     | 0,996                    | 0,993                    | 0,981       | 0,914        | 0,939        | 0,714      | 0,992       | 0,992       | 0,846         | 0,864       | 0,520        | —           |
| 7,0             | 0,956        | 0,500                                     | 0,996                    | 0,990                    | 0,981       | 0,914        | 0,939        | 0,707      | 0,992       | 0,993       | 0,846         | 0,753       | —            | —           |
| 8,0             | 0,956        | —                                         | 0,994                    | 0,975                    | 0,979       | 0,914        | 0,939        | 0,707      | 0,992       | 0,994       | 0,846         | 0,634       | —            | 0,960       |
| 9,0             | 0,956        | —                                         | 0,993                    | 0,930                    | 0,979       | 0,914        | 0,939        | 0,700      | 0,992       | 0,994       | 0,852         | —           | —            | 0,950       |
| 10,0            | 0,956        | —                                         | 0,987                    | —                        | 0,979       | 0,914        | 0,939        | 0,693      | 0,992       | 0,995       | 0,852         | —           | —            | 0,930       |
| 11,0            | 0,955        | —                                         | 0,987                    | —                        | 0,977       | 0,914        | 0,939        | 0,678      | 0,993       | 0,995       | 0,852         | —           | —            | 0,870       |
| 12,0            | 0,956        | —                                         | 0,903                    | —                        | 0,977       | 0,914        | 0,936        | 0,671      | 0,993       | 0,995       | 0,852         | —           | —            | 0,780       |

\*1 Сапфир.

Таблица 31.21. Показатель преломления  $n_o$  луча обыкновенного для оптических кристаллов при  
температуре 293 К [37]

| $\lambda$ , нм | AgCl    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(сапфир) | BaF <sub>2</sub> | CaF <sub>2</sub> | CsI    | Ge     | KBr    | KCl    | KRS-5  | LiF    | NaCl   | NaF     |
|----------------|---------|--------------------------------------------|------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 199,0          | —       | —                                          | —                | 1,4964           | —      | —      | —      | —      | —      | 1,4402 | —      | —       |
| 340,4          | —       | —                                          | —                | 1,4477           | —      | —      | 1,6172 | 1,5271 | —      | 1,4036 | 1,5861 | —       |
| 404,7          | —       | —                                          | —                | 1,4415           | —      | —      | 1,5899 | 1,5100 | —      | 1,3985 | 1,5666 | —       |
| 486,1          | —       | —                                          | —                | 1,4370           | —      | —      | 1,5719 | 1,4982 | —      | 1,3948 | 1,5533 | —       |
| 589,3          | —       | 1,56780                                    | —                | 1,4338           | —      | —      | 1,5600 | 1,4902 | —      | 1,3920 | 1,5442 | —       |
| 656,3          | —       | —                                          | —                | 1,4325           | —      | —      | 1,5552 | 1,4870 | —      | 1,3908 | 1,5405 | —       |
| 766,5          | —       | —                                          | —                | 1,4309           | —      | —      | 1,5502 | 1,4835 | —      | 1,3893 | 1,5366 | 1,32305 |
| 863,0          | —       | —                                          | —                | 1,4299           | —      | —      | 1,5472 | 1,4815 | —      | 1,3883 | 1,5343 | —       |
| 1000           | 2,02239 | 1,75660                                    | 1,4686           | 1,4289           | 1,7576 | —      | 1,5445 | 1,4799 | 2,4474 | 1,3872 | 1,5322 | 1,32174 |
| 1060 [38]      | —       | —                                          | 1,4681           | 1,4285           | —      | —      | 1,5430 | —      | —      | 1,3866 | —      | 1,3210  |
| 1200           | 2,01582 | —                                          | 1,4675           | 1,4278           | 1,7530 | —      | 1,5421 | 1,4779 | 2,4258 | 1,3856 | 1,5302 | 1,3205  |
| 1500           | 2,01047 | 1,74650                                    | 1,4663           | 1,4263           | 1,7494 | —      | 1,5399 | 1,4769 | 2,4089 | 1,3832 | 1,5284 | 1,3189  |
| 2000           | 2,00615 | 1,73753                                    | 1,4647           | 1,4239           | 1,7465 | 4,116  | 1,5383 | 1,4754 | 2,3962 | 1,3788 | 1,5268 | 1,3170  |
| 2500           | 2,00386 | —                                          | 1,4630           | 1,4211           | 1,7451 | 4,072  | 1,5374 | 1,4745 | 2,3903 | 1,3733 | 1,5255 | 1,3155  |
| 3000           | 2,00230 | —                                          | 1,4612           | 1,4179           | 1,7444 | 4,045  | 1,5368 | 1,4736 | 2,3869 | 1,3666 | 1,5244 | 1,3133  |
| 4000           | 1,99983 | 1,62675                                    | 1,4570           | 1,4097           | 1,7434 | —      | 1,5357 | 1,4721 | 2,3841 | 1,3495 | 1,5220 | 1,3085  |
| 5000           | 1,99745 | —                                          | 1,4511           | 1,3990           | 1,7427 | —      | 1,5345 | 1,4704 | 2,3810 | 1,3267 | 1,5190 | 1,3015  |
| 6000           | 1,99483 | —                                          | 1,4441           | 1,3856           | 1,7421 | —      | 1,5332 | 1,4684 | 2,3791 | 1,2975 | 1,5155 | 1,2930  |
| 8000           | 1,98847 | —                                          | 1,4259           | 1,3499           | 1,7409 | —      | 1,5302 | 1,4633 | 2,3757 | —      | 1,5066 | 1,2705  |
| 10 000         | 1,98034 | —                                          | 1,4014           | —                | 1,7395 | 4,0025 | 1,5264 | 1,4570 | 2,3719 | —      | 1,4949 | 1,2380  |
| 10 600 [38]    | —       | —                                          | 1,3900           | —                | —      | 4,0020 | 1,5250 | —      | —      | 1,0500 | —      | 1,2200  |
| 12000          | 1,97026 | —                                          | —                | —                | 1,7378 | 4,0018 | 1,5217 | 1,4480 | 2,3673 | —      | 1,4801 | 1,1820  |
| 15000          | 1,95113 | —                                          | —                | —                | 1,7347 | 4,0014 | 1,5129 | 1,4320 | 2,3592 | —      | 1,4515 | —       |
| 20 000         | 1,90688 | —                                          | —                | —                | 1,7280 | —      | 1,4926 | 1,3998 | 2,3417 | —      | —      | —       |
| 25 000         | —       | —                                          | —                | —                | 1,7192 | —      | 1,4642 | —      | 2,3186 | —      | —      | —       |
| 30 000         | —       | —                                          | —                | —                | 1,7077 | —      | —      | —      | 2,2896 | —      | —      | —       |
| 40 000         | —       | —                                          | —                | —                | 1,6785 | —      | —      | —      | 2,2113 | —      | —      | —       |
| 50 000         | —       | —                                          | —                | —                | 1,6369 | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —       |



Таблица 31.22. Спектральный коэффициент пропускания оптической керамики толщиной 1 мм при температуре 293 К [20]

Продолжение табл. 31.22

Погрешность измерения  $\pm 5\%$

| $\lambda$ , мкм | $\tau_{\lambda 1}$ для керамики на основе |      |                  |      |      |                                    |
|-----------------|-------------------------------------------|------|------------------|------|------|------------------------------------|
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | CdTe | MgF <sub>2</sub> | ZnS  | ZnSe | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [39] |
| 1               | —                                         | —    | —                | 0,73 | —    | —                                  |
| 2               | 0,17                                      | 0,65 | 0,90             | 0,92 | 0,28 | 0,42                               |
| 3               | 0,24                                      | 0,43 | 0,92             | 0,93 | 0,34 | 0,45                               |
| 4               | 0,29                                      | 0,55 | 0,95             | 0,93 | 0,43 | 0,49                               |
| 5               | 0,34                                      | 0,46 | 0,92             | 0,93 | 0,53 | 0,53                               |
| 6               | 0,29                                      | 0,47 | 0,94             | 0,93 | 0,57 | 0,51                               |

| $\lambda$ , мкм | $\tau_{\lambda 1}$ для керамики на основе |      |                  |      |      |                                    |
|-----------------|-------------------------------------------|------|------------------|------|------|------------------------------------|
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | CdTe | MgF <sub>2</sub> | ZnS  | ZnSe | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [39] |
| 7               | 0,068                                     | 0,48 | 0,88             | 0,93 | 0,55 | 0,43                               |
| 8               | 0,022                                     | —    | 0,44             | 0,93 | 0,54 | 0,29                               |
| 9               | —                                         | —    | 0,20             | 0,93 | 0,53 | 0,13                               |
| 10              | —                                         | —    | —                | 0,91 | 0,54 | 0,022                              |
| 11              | —                                         | —    | —                | 0,89 | 0,54 | —                                  |
| 12              | —                                         | —    | —                | 0,87 | 0,51 | —                                  |
| 13              | —                                         | —    | —                | 0,83 | 0,50 | —                                  |
| 14              | —                                         | —    | —                | 0,73 | 0,50 | —                                  |

### 31.5. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.23. Коэффициент теплового излучения промышленных эмалей при 293 К [40]

Образцы в виде слоев эмали на металлической подложке. Погрешность измерения  $\pm 7\%$

| Марка эмали                              | Толщина слоя эмали, мкм | $\epsilon_T^n$ при облучении эмали от черного тела, нагретого до температуры, К |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                          |                         | 500                                                                             | 750  | 1000 | 1250 | 1500 | 1750 | 2000 | 2250 | 2500 | 2750 |
| Автоэмаль синтетическая № 891 (вишневая) | 20                      | 0,20                                                                            | 0,17 | 0,14 | 0,11 | 0,09 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
|                                          | 30                      | 0,25                                                                            | 0,22 | 0,18 | 0,15 | 0,13 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
|                                          | 60                      | 0,38                                                                            | 0,34 | 0,29 | 0,25 | 0,22 | 0,21 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,17 |
|                                          | 100                     | 0,47                                                                            | 0,43 | 0,38 | 0,35 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,27 | 0,26 | 0,26 |
| Автоэмаль синтетическая № 835 (синяя)    | 20                      | 0,13                                                                            | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
|                                          | 30                      | 0,17                                                                            | 0,15 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,10 |
|                                          | 60                      | 0,28                                                                            | 0,25 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,19 | 0,18 |
|                                          | 100                     | 0,38                                                                            | 0,36 | 0,35 | 0,34 | 0,33 | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,27 |
| МЛ-12-02                                 | 20                      | 0,18                                                                            | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
|                                          | 30                      | 0,24                                                                            | 0,23 | 0,22 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0,22 |
|                                          | 60                      | 0,37                                                                            | 0,36 | 0,35 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,32 |
|                                          | 100                     | 0,46                                                                            | 0,47 | 0,46 | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,40 |
| МЧ-13 (электрик)                         | 20                      | 0,23                                                                            | 0,20 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
|                                          | 30                      | 0,30                                                                            | 0,27 | 0,24 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
|                                          | 60                      | 0,45                                                                            | 0,40 | 0,35 | 0,32 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
|                                          | 100                     | 0,55                                                                            | 0,48 | 0,45 | 0,41 | 0,40 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,36 |
| МЧ-13 (вишневая)                         | 20                      | 0,15                                                                            | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
|                                          | 30                      | 0,21                                                                            | 0,19 | 0,17 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
|                                          | 60                      | 0,33                                                                            | 0,30 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
|                                          | 100                     | 0,41                                                                            | 0,40 | 0,39 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 |
| ФСХ № 15 (голубая)                       | 20                      | 0,06                                                                            | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
|                                          | 30                      | 0,08                                                                            | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
|                                          | 60                      | 0,15                                                                            | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
|                                          | 100                     | 0,22                                                                            | 0,21 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| ФСХ № 26 (красно-коричневая)             | 20                      | 0,05                                                                            | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,10 |
|                                          | 30                      | 0,10                                                                            | 0,15 | 0,20 | 0,21 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 |
|                                          | 60                      | 0,15                                                                            | 0,25 | 0,30 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,26 | 0,24 | 0,23 | 0,22 |
|                                          | 100                     | 0,22                                                                            | 0,32 | 0,38 | 0,40 | 0,38 | 0,36 | 0,34 | 0,33 | 0,32 | 0,30 |

Таблица 31.24. Коэффициент поглощения соличесного излучения терморегулирующих однослойных покрытий при температуре 293—300 К

Погрешность измерения  $\pm 7\%$

| Тип покрытия                                      | $\alpha_S$ | Литература | Тип покрытия                       | $\alpha_S$ | Литература |
|---------------------------------------------------|------------|------------|------------------------------------|------------|------------|
| Грунтовка мелкозернистая на магниевой подложке    | 0,94       | [41]       | КО-990 на дуралюминиевой подложке  | 0,31       | [44]       |
| Диоксид титана:                                   |            |            | КО-990 на медной подложке          | 0,28       | [44]       |
| белый                                             | 0,19       | [41]       | КЛ-990 на стальной подложке        | 0,66       | [44]       |
| серый                                             | 0,87       | [41]       | УР-231 на дуралюминиевой подложке  | 0,34       | [44]       |
| Краска:                                           |            |            | УР-231 на медной подложке          | 0,31       | [44]       |
| алюминиевая на окисленной дуралюминиевой подложке | 0,42       | [41]       | УР-231 на стальной подложке        | 0,69       | [44]       |
| белая акриловая                                   | 0,26       | [42]       | ФБР-74Д на дуралюминиевой подложке | 0,38       | [44]       |
| белая неорганическая                              | 0,13       | [41]       | ФБР-74Д на медной подложке         | 0,34       | [44]       |
| черная глянцевая                                  | 0,98       | [43]       | ФБР-74Д на стальной подложке       | 0,68       | [44]       |
| черная матовая Minnesota 3М                       | 0,99       | [41]       | Э-4100 на дуралюминиевой подложке  | 0,46       | [44]       |
| черная матовая Catalac Thermoflat                 | 0,96       | [44]       | Э-4100 на медной подложке          | 0,41       | [44]       |
| Лак:                                              |            |            | Э-4100 на стальной подложке        | 0,67       | [44]       |
| КО-815 на дуралюминиевой подложке                 | 0,40       | [44]       | Эмаль белая фарфоровая             | 0,30       | [41]       |
| КО-815 на медной подложке                         | 0,30       | [44]       |                                    |            |            |
| КО-815 на стальной подложке                       | 0,67       | [44]       |                                    |            |            |

Таблица 31.25. Коэффициент теплового излучения пигментов [45]  
Погрешность измерения  $\pm 7$

Продолжение табл. 31.25

| Цвет пигмента | Основа пигмента | $\epsilon_T$ при температуре, К |      |
|---------------|-----------------|---------------------------------|------|
|               |                 | 117                             | 293  |
|               |                 |                                 |      |
| Белый         | $Al_2O_3$       | 0,94                            | 0,95 |
| Белый         | $CaO$           | 0,94                            | 0,94 |
| Белый         | $MgCO_3$        | 0,91                            | 0,95 |
| Белый         | $MgO$           | 0,91                            | 0,94 |
| Белый         | $PbCO_3$        | 0,93                            | 0,90 |
| Белый         | $ThO_2$         | 0,90                            | 0,90 |
| Белый         | $Y_2O_3$        | 0,90                            | 0,89 |

| Цвет пигмента | Основа пигмента | $\epsilon_T$ при температуре, К |      |
|---------------|-----------------|---------------------------------|------|
|               |                 | 117                             | 293  |
| Белый         | $ZnO$           | 0,95                            | 0,95 |
| Белый         | $ZrO_2$         | 0,95                            | 0,95 |
| Желтый        | $PbO$           | 0,90                            | 0,80 |
| Желтый        | $PbCrO_4$       | 0,93                            | 0,96 |
| Зеленый       | $Cr_2O_3$       | 0,92                            | 0,93 |
| Красный       | $Fe_2O_3$       | 0,91                            | 0,94 |
| Синий         | $Co_2O_3$       | 0,94                            | 0,90 |
| Черный        | $CuO$           | 0,96                            | —    |

### 31.6. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Таблица 31.26. Спектральный коэффициент теплового излучения легких металлов [46]  
Образцы полированные, неоокисленные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| Металл   | T, К | $\epsilon_\lambda''$ при $\lambda$ , мкм |       |       |       |       |       |       |
|----------|------|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |      | 2                                        | 3     | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    |
| Алюминий | 400  | 0,050                                    | 0,041 | 0,035 | 0,028 | 0,025 | 0,021 | 0,019 |
|          | 500  | 0,054                                    | 0,045 | 0,038 | 0,032 | 0,027 | 0,024 | 0,021 |
|          | 600  | 0,060                                    | 0,050 | 0,044 | 0,035 | 0,030 | 0,026 | 0,024 |
|          | 700  | 0,065                                    | 0,055 | 0,047 | 0,038 | 0,033 | 0,029 | 0,025 |
|          | 800  | 0,070                                    | 0,057 | 0,049 | 0,042 | 0,036 | 0,032 | 0,029 |
|          | 900  | 0,074                                    | 0,061 | 0,053 | 0,043 | 0,038 | 0,034 | 0,031 |
| Магний   | 400  | 0,063                                    | 0,052 | 0,044 | 0,036 | 0,031 | 0,027 | 0,024 |
|          | 500  | 0,071                                    | 0,058 | 0,050 | 0,040 | 0,035 | 0,030 | 0,028 |
|          | 600  | 0,085                                    | 0,066 | 0,056 | 0,045 | 0,038 | 0,034 | 0,032 |
|          | 700  | —                                        | 0,070 | 0,060 | 0,048 | 0,042 | 0,037 | 0,035 |
|          | 800  | —                                        | 0,076 | 0,065 | 0,053 | 0,045 | 0,040 | 0,037 |
|          | 900  | —                                        | 0,080 | 0,069 | 0,056 | 0,048 | 0,043 | 0,040 |

Таблица 31.27. Коэффициент теплового излучения алюминия [20]

Образцы полированные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| $T, K$ | $\epsilon_T$ | $T, K$ | $\epsilon_T$ | $T, K$ | $\epsilon_T$ | $T, K$ | $\epsilon_T$ |
|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|
| 50     | 0,0080       | 90     | 0,010        | 200    | 0,018        | 500    | 0,039        |
| 60     | 0,0085       | 100    | 0,011        | 250    | 0,021        | 600    | 0,046        |
| 70     | 0,0090       | 120    | 0,012        | 300    | 0,025        | 700    | 0,054 [19]   |
| 80     | 0,0095       | 150    | 0,013        | 400    | 0,032        | 800    | 0,062 [19]   |

Таблица 31.28. Спектральный коэффициент отражения пленок алюминия при температуре от 291 до 295 К [20]

Пленки получены испарением при давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па на стеклянные подложки. Угол падения потока излучения  $0^\circ$ . Погрешность измерения  $\pm 2\%$

| $\lambda, \text{нм}$ | $\rho_\lambda$ | $\lambda, \text{нм}$ | $\rho_\lambda$ | $\lambda, \text{нм}$ | $\rho_\lambda$ |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| 300                  | 0,80           | 650                  | 0,82           | 1100                 | 0,93           |
| 400                  | 0,93           | 700                  | 0,85           | 1200                 | 0,90           |
| 500                  | 0,93           | 800                  | 0,82           | 3000                 | 0,91           |
| 600                  | 0,90           | 900                  | 0,84           | 4000                 | 0,92           |
|                      |                | 1000                 | 0,90           |                      |                |

Таблица 31.29 Спектральный коэффициент теплового излучения тугоплавких металлов [18]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| Металл       | $T, K$ | $\epsilon_\lambda^n$ при $\lambda, \text{мкм}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------|--------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |        | 0,30                                           | 0,40  | 0,50  | 0,60  | 0,70  | 0,80  | 0,90  | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 4,0   | 5,0   |
| Ванадий [20] | 300    | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,16  | 0,12  | 0,090 | 0,080 |
| Вольфрам     | 1200   | 0,486                                          | 0,482 | 0,474 | 0,461 | 0,446 | 0,428 | 0,408 | 0,386 | 0,186 | 0,112 | 0,086 | 0,078 |
|              | 1600   | 0,480                                          | 0,479 | 0,466 | 0,451 | 0,436 | 0,418 | 0,399 | 0,378 | 0,204 | 0,134 | 0,108 | 0,098 |
|              | 2000   | 0,474                                          | 0,470 | 0,459 | 0,441 | 0,426 | 0,408 | 0,390 | 0,371 | 0,222 | 0,157 | 0,130 | 0,117 |
|              | 2600   | 0,465                                          | 0,461 | 0,447 | 0,426 | 0,411 | 0,394 | 0,376 | 0,360 | 0,248 | 0,191 | 0,163 | 0,146 |
| Молибден     | 1000   | —                                              | 0,458 | 0,438 | 0,417 | 0,394 | 0,367 | 0,333 | 0,302 | 0,106 | 0,063 | 0,046 | 0,035 |
|              | 1200   | —                                              | 0,448 | 0,429 | 0,410 | 0,389 | 0,363 | 0,333 | 0,306 | 0,130 | 0,081 | 0,061 | 0,049 |
|              | 1600   | —                                              | 0,432 | 0,415 | 0,397 | 0,378 | 0,358 | 0,333 | 0,312 | 0,165 | 0,108 | 0,068 | 0,084 |
|              | 2000   | —                                              | 0,419 | 0,403 | 0,387 | 0,370 | 0,352 | 0,333 | 0,317 | 0,191 | 0,133 | 0,084 | 0,068 |
| Ниобий       | 1600   | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,175 | 0,151 | 0,126 | 0,110 |
|              | 1800   | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,190 | 0,170 | 0,145 | 0,125 |
|              | 2000   | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,205 | 0,177 | 0,155 | 0,135 |
| Рений        | 1810   | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,360 | 0,260 | —     | —     | —     |
|              | 2388   | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,362 | 0,275 | —     | —     | —     |
|              | 3045   | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,365 | 0,285 | —     | —     | —     |
| Тантал       | 1200   | —                                              | 0,525 | 0,510 | 0,473 | 0,421 | 0,363 | 0,304 | 0,262 | 0,148 | 0,123 | 0,108 | —     |
|              | 1600   | —                                              | 0,516 | 0,495 | 0,458 | 0,412 | 0,361 | 0,316 | 0,281 | 0,172 | 0,145 | 0,128 | —     |
|              | 2000   | —                                              | 0,507 | 0,480 | 0,444 | 0,405 | 0,362 | 0,327 | 0,299 | 0,196 | 0,167 | 0,148 | —     |
|              | 2400   | —                                              | 0,498 | 0,464 | 0,432 | 0,399 | 0,366 | 0,338 | 0,317 | 0,220 | 0,190 | 0,168 | —     |
| Титан [24]   | 300    | —                                              | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 0,35  | 0,29  | 0,23  | 0,18  |
| Хром [24]    | 293    | 0,47                                           | 0,40  | 0,40  | 0,40  | 0,43  | 0,41  | 0,40  | 0,40  | 0,24  | 0,20  | 0,21  | 0,17  |

Таблица 31.30. Коэффициент теплового излучения  $\epsilon_T$  тугоплавких металлов

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| $T, K$ | V [19] | W [47] | Hf [19] | Mo [18] | Nb [18] | Re [18] | Ta [18] | Ti [19] | Cr [19] | Zr [19] |
|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1000   | 0,145  | 0,105  | —       | —       | 0,116   | 0,164   | 0,132   | 0,227   | 0,353   | —       |
| 1100   | 0,161  | 0,128  | —       | 0,105   | 0,127   | 0,173   | 0,141   | 0,239   | 0,360   | 0,204   |
| 1200   | 0,176  | 0,133  | 0,284   | 0,117   | 0,138   | 0,181   | 0,149   | 0,251   | 0,372   | 0,214   |
| 1400   | 0,201  | 0,164  | 0,294   | 0,142   | 0,158   | 0,201   | 0,168   | 0,274   | —       | 0,232   |
| 1600   | 0,222  | 0,195  | 0,304   | 0,166   | 0,178   | 0,225   | 0,186   | 0,297   | —       | 0,248   |

| T, K | V [19] | W [47] | Hf [19] | Mo [18] | Nb [18] | Re [18] | Ta [18] | Ti [19] | Cr [19] | Zr [19] |
|------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1800 | 0,241  | 0,223  | 0,314   | 0,192   | 0,195   | 0,245   | 0,205   | 0,316   | —       | 0,261   |
| 2000 | 0,257  | 0,249  | 0,324   | 0,214   | 0,212   | 0,264   | 0,224   | —       | —       | 0,272   |
| 2200 | —      | 0,269  | —       | 0,234   | 0,228   | 0,282   | 0,242   | —       | —       | —       |
| 2400 | —      | 0,287  | —       | 0,254   | 0,244   | 0,296   | 0,259   | —       | —       | —       |
| 2600 | —      | 0,302  | —       | 0,269   | —       | 0,309   | 0,274   | —       | —       | —       |
| 2800 | —      | 0,314  | —       | 0,282   | —       | 0,318   | 0,288   | —       | —       | —       |
| 3000 | —      | 0,325  | —       | —       | —       | —       | 0,300   | —       | —       | —       |
| 3400 | —      | 0,345  | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       |

Таблица 31.31. Спектральный коэффициент теплового излучения цветных металлов и их сплавов [46]  
Образцы нихрома зачищенные; образцы других материалов полированные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| Материал        | T, K | $\epsilon_{\lambda}^n$ при $\lambda$ , мкм |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|------|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 |      | 2                                          | 3     | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    |
| Бронза          | 273  | 0,057                                      | 0,049 | 0,043 | 0,035 | 0,031 | 0,029 | 0,027 |
|                 | 293  | 0,059                                      | 0,051 | 0,045 | 0,037 | 0,033 | 0,031 | 0,029 |
|                 | 400  | 0,070                                      | 0,057 | 0,050 | 0,041 | 0,035 | 0,032 | 0,029 |
|                 | 600  | 0,086                                      | 0,070 | 0,062 | 0,052 | 0,045 | 0,040 | 0,037 |
|                 | 800  | 0,099                                      | 0,082 | 0,073 | 0,058 | 0,051 | 0,047 | 0,042 |
|                 | 1000 | 0,11                                       | 0,092 | 0,080 | 0,065 | 0,056 | 0,052 | 0,049 |
|                 | 1400 | 0,13                                       | 0,11  | 0,093 | 0,078 | 0,067 | 0,060 | 0,056 |
| Кобальт         | 400  | 0,074                                      | 0,063 | 0,055 | 0,044 | 0,037 | 0,033 | 0,030 |
|                 | 500  | 0,085                                      | 0,072 | 0,062 | 0,052 | 0,044 | 0,039 | 0,036 |
|                 | 600  | 0,094                                      | 0,080 | 0,070 | 0,057 | 0,050 | 0,045 | 0,040 |
|                 | 800  | 0,11                                       | 0,094 | 0,082 | 0,067 | 0,057 | 0,053 | 0,048 |
|                 | 1000 | 0,13                                       | 0,11  | 0,093 | 0,076 | 0,066 | 0,059 | 0,055 |
|                 | 1400 | 0,15                                       | 0,13  | 0,11  | 0,090 | 0,078 | 0,071 | 0,065 |
|                 | 1800 | 0,17                                       | 0,14  | 0,13  | 0,10  | 0,090 | 0,080 | 0,074 |
| Константан [20] | 293  | 0,16                                       | 0,14  | 0,12  | 0,098 | 0,085 | 0,076 | 0,070 |
| Манганин [20]   | 293  | 0,16                                       | 0,13  | 0,11  | 0,093 | 0,080 | 0,072 | 0,065 |
| Медь            | 400  | 0,040                                      | 0,033 | 0,027 | 0,022 | 0,019 | 0,017 | 0,015 |
|                 | 500  | 0,044                                      | 0,037 | 0,032 | 0,025 | 0,022 | 0,019 | 0,017 |
|                 | 600  | 0,048                                      | 0,040 | 0,035 | 0,028 | 0,024 | 0,021 | 0,019 |
|                 | 800  | 0,057                                      | 0,047 | 0,040 | 0,034 | 0,029 | 0,025 | 0,023 |
|                 | 1000 | 0,064                                      | 0,053 | 0,046 | 0,037 | 0,033 | 0,029 | 0,027 |
|                 | 1200 | 0,070                                      | 0,059 | 0,050 | 0,041 | 0,035 | 0,032 | 0,029 |
| Никель          | 400  | 0,083                                      | 0,069 | 0,060 | 0,048 | 0,042 | 0,038 | 0,034 |
|                 | 500  | 0,095                                      | 0,079 | 0,069 | 0,056 | 0,048 | 0,043 | 0,040 |
|                 | 600  | 0,11                                       | 0,088 | 0,077 | 0,063 | 0,054 | 0,048 | 0,044 |
|                 | 800  | 0,12                                       | 0,10  | 0,090 | 0,074 | 0,065 | 0,057 | 0,053 |
|                 | 1000 | 0,14                                       | 0,12  | 0,10  | 0,084 | 0,073 | 0,066 | 0,060 |
|                 | 1400 | 0,17                                       | 0,14  | 0,12  | 0,10  | 0,088 | 0,078 | 0,073 |
|                 | 1600 | 0,18                                       | 0,15  | 0,13  | 0,11  | 0,094 | 0,084 | 0,077 |
| Нихром          | 400  | 0,23                                       | 0,19  | 0,17  | 0,14  | 0,12  | 0,11  | 0,10  |
|                 | 600  | 0,24                                       | 0,20  | 0,18  | 0,14  | 0,13  | 0,11  | 0,10  |
|                 | 800  | 0,25                                       | 0,21  | 0,18  | 0,15  | 0,13  | 0,12  | 0,11  |
|                 | 1200 | 0,26                                       | 0,22  | 0,19  | 0,16  | 0,14  | 0,13  | 0,12  |
|                 | 1600 | 0,27                                       | 0,23  | 0,20  | 0,17  | 0,15  | 0,13  | 0,12  |

Таблица 31.32. Спектральный коэффициент отражения меди и никеля при температуре 291—295 К [28]

Образцы полированные. Угол падения потока излучения 0°. Погрешность измерения  $\pm 5\%$

| $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ |       | $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ |       |
|----------------|----------------|-------|----------------|----------------|-------|
|                | Cu             | Ni    |                | Cu             | Ni    |
| 300            | 0,250          | 0,440 | 1000           | 0,901          | 0,725 |
| 500            | 0,440          | 0,612 | 1100           | 0,903          | 0,730 |
| 589            | 0,705          | —     | 1200           | 0,905          | 0,740 |
| 600            | 0,720          | 0,650 | 2000           | 0,955          | 0,835 |
| 700            | 0,830          | 0,695 | 3000           | —              | 0,884 |
| 800            | 0,890          | 0,705 | 4000           | 0,973          | 0,918 |
| 900            | 0,890          | 0,710 | 5000           | 0,968          | 0,940 |
|                |                |       | 10 000         | —              | 0,955 |

Таблица 31.33. Коэффициент теплового излучения кобальта, меди и никеля [19]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения  $\pm 7\%$

| T, К | $\epsilon_T$ |       |       | T, К | $\epsilon_T$ |       |       |
|------|--------------|-------|-------|------|--------------|-------|-------|
|      | Co           | Cu    | Ni    |      | Co           | Cu    | Ni    |
| 200  | —            | 0,023 | —     | 900  | 0,157        | 0,054 | 0,132 |
| 300  | —            | 0,024 | 0,068 | 1000 | 0,175        | 0,058 | 0,144 |
| 400  | —            | 0,027 | 0,078 | 1100 | 0,205        | 0,061 | 0,156 |
| 500  | —            | 0,031 | 0,088 | 1200 | 0,225        | —     | 0,168 |
| 600  | —            | 0,036 | 0,099 | 1300 | —            | —     | 0,179 |
| 700  | 0,125        | 0,043 | 0,110 | 1400 | —            | —     | 0,188 |
| 800  | 0,148        | 0,050 | 0,120 | 1500 | —            | —     | 0,196 |

Таблица 31.34. Спектральный коэффициент теплового излучения благородных металлов [46]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| Металл       | T, К | $\epsilon_\lambda^n$ при $\lambda$ , мкм |       |       |       |       |       |       |
|--------------|------|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |      | 2                                        | 3     | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    |
| Золото       | 400  | 0,046                                    | 0,037 | 0,032 | 0,027 | 0,023 | 0,020 | 0,018 |
|              | 600  | 0,056                                    | 0,047 | 0,040 | 0,032 | 0,027 | 0,025 | 0,022 |
|              | 800  | 0,065                                    | 0,054 | 0,046 | 0,038 | 0,033 | 0,029 | 0,027 |
|              | 1000 | 0,073                                    | 0,060 | 0,052 | 0,042 | 0,036 | 0,033 | 0,030 |
|              | 1200 | 0,078                                    | 0,066 | 0,057 | 0,047 | 0,040 | 0,036 | 0,033 |
| Иридий       | 400  | 0,072                                    | 0,060 | 0,052 | 0,042 | 0,037 | 0,033 | 0,030 |
|              | 600  | 0,088                                    | 0,075 | 0,065 | 0,053 | 0,045 | 0,041 | 0,037 |
|              | 800  | 0,10                                     | 0,085 | 0,074 | 0,060 | 0,052 | 0,047 | 0,043 |
|              | 1000 | 0,11                                     | 0,094 | 0,082 | 0,067 | 0,058 | 0,053 | 0,048 |
|              | 1200 | 0,12                                     | 0,10  | 0,089 | 0,074 | 0,064 | 0,057 | 0,053 |
|              | 1600 | 0,14                                     | 0,12  | 0,10  | 0,085 | 0,074 | 0,066 | 0,061 |
|              | 2000 | 0,16                                     | 0,13  | 0,11  | 0,095 | 0,082 | 0,074 | 0,067 |
|              | 2400 | 0,17                                     | 0,14  | 0,12  | 0,10  | 0,090 | 0,081 | 0,075 |
|              | 2800 | —                                        | 0,15  | 0,14  | 0,11  | 0,096 | 0,087 | 0,080 |
| Палладий     | 400  | 0,095                                    | 0,078 | 0,069 | 0,057 | 0,048 | 0,042 | 0,039 |
|              | 600  | 0,11                                     | 0,095 | 0,083 | 0,072 | 0,060 | 0,052 | 0,050 |
|              | 800  | 0,13                                     | 0,11  | 0,095 | 0,082 | 0,069 | 0,062 | 0,057 |
|              | 1000 | 0,15                                     | 0,12  | 0,11  | 0,095 | 0,077 | 0,068 | 0,063 |
|              | 1400 | 0,17                                     | 0,14  | 0,12  | 0,11  | 0,090 | 0,080 | 0,075 |
|              | 1800 | —                                        | 0,16  | 0,14  | 0,12  | 0,10  | 0,091 | 0,085 |
|              | 2200 | —                                        | 0,18  | 0,15  | 0,13  | 0,11  | 0,10  | 0,093 |
| Платина      | 400  | 0,091                                    | 0,075 | 0,067 | 0,055 | 0,049 | 0,042 | 0,039 |
|              | 600  | 0,11                                     | 0,093 | 0,081 | 0,068 | 0,059 | 0,053 | 0,047 |
|              | 800  | 0,13                                     | 0,11  | 0,093 | 0,077 | 0,069 | 0,061 | 0,057 |
|              | 1000 | 0,15                                     | 0,12  | 0,11  | 0,086 | 0,075 | 0,070 | 0,063 |
|              | 1400 | 0,17                                     | 0,14  | 0,12  | 0,10  | 0,088 | 0,079 | 0,071 |
|              | 1800 | —                                        | 0,16  | 0,14  | 0,11  | 0,10  | 0,090 | 0,081 |
|              | 2000 | —                                        | 0,17  | 0,15  | 0,12  | 0,11  | 0,095 | 0,087 |
| Родий [20]   | 293  | 0,10                                     | 0,080 | 0,060 | 0,042 | 0,040 | 0,040 | 0,040 |
| Серебро [20] | 293  | 0,025                                    | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,015 | 0,013 |

Таблица 31.35. Коэффициент теплового излучения  $\epsilon_T$  благородных металлов [18]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения  $\pm 7\%$

| T, K | Au    | Ir [18] | Pd    | Pt    | Rh    | Ag    |
|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 200  | 0,020 | —       | —     | —     | —     | 0,016 |
| 300  | 0,025 | 0,040   | 0,030 | 0,032 | 0,019 | 0,019 |
| 400  | 0,029 | —       | —     | —     | —     | 0,022 |
| 600  | 0,038 | —       | —     | —     | —     | 0,029 |

Продолжение табл. 31.35

| T, K | Au    | Ir [18] | Pd    | Pt    | Rh    | Ag    |
|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 800  | 0,047 | —       | —     | —     | —     | 0,036 |
| 1000 | 0,056 | 0,210   | 0,100 | 0,128 | 0,084 | 0,043 |
| 1200 | 0,065 | 0,215   | 0,135 | 0,149 | 0,112 | —     |
| 1400 | —     | 0,216   | 0,162 | 0,167 | 0,133 | —     |
| 1600 | —     | 0,218   | 0,179 | 0,183 | 0,150 | —     |
| 1800 | —     | 0,220   | —     | 0,196 | 0,163 | —     |
| 2000 | —     | 0,228   | —     | —     | 0,178 | —     |
| 2200 | —     | 0,230   | —     | —     | 0,183 | —     |

Таблица 31.36. Спектральный коэффициент пропускания и отражения пленок золота различной толщины при температуре от 291 до 295 К [48]

Пленки получены испарением при давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па на кварцевые полированные подложки. Погрешность измерения  $\pm 2\%$ . Угол падения потока излучения  $0^\circ$

| Толщина пленки, нм | $\tau_\lambda$ при $\lambda$ , нм |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 253,6                             | 275,3 | 296,7 | 334,1 | 361,0 | 404,6 | 435,8 | 480,0 | 508,5 | 546,1 | 578,0 | 643,8 |
| 5                  | 0,590                             | 0,583 | 0,596 | 0,619 | 0,635 | 0,652 | 0,667 | 0,690 | 0,689 | 0,660 | 0,618 | 0,542 |
| 10                 | 0,444                             | 0,427 | 0,438 | 0,468 | 0,485 | 0,506 | 0,533 | 0,589 | 0,616 | 0,597 | 0,558 | 0,454 |
| 20                 | 0,238                             | 0,230 | 0,265 | 0,274 | 0,295 | 0,320 | 0,349 | 0,424 | 0,464 | 0,433 | 0,378 | 0,290 |
| 30                 | 0,128                             | 0,121 | 0,130 | 0,163 | 0,180 | 0,201 | 0,226 | 0,293 | 0,317 | 0,270 | 0,226 | 0,153 |
| 40                 | 0,066                             | 0,066 | 0,072 | 0,097 | 0,112 | 0,130 | 0,152 | 0,207 | 0,220 | 0,170 | 0,133 | 0,084 |
| 50                 | 0,033                             | 0,033 | 0,039 | 0,057 | 0,072 | 0,086 | 0,104 | 0,151 | 0,155 | 0,111 | 0,082 | 0,049 |
| 60                 | 0,019                             | 0,019 | 0,023 | 0,036 | 0,046 | 0,057 | 0,072 | 0,107 | 0,109 | 0,072 | 0,053 | 0,031 |
| 70                 | 0,010                             | 0,012 | 0,014 | 0,024 | 0,033 | 0,042 | 0,053 | 0,079 | 0,081 | 0,051 | 0,035 | 0,022 |
| 85                 | 0,010                             | 0,012 | 0,011 | 0,018 | 0,025 | 0,033 | 0,041 | 0,065 | 0,064 | 0,037 | 0,026 | 0,015 |
| 95                 | 0,010                             | 0,010 | 0,010 | 0,015 | 0,021 | 0,027 | 0,034 | 0,054 | 0,053 | 0,031 | 0,021 | 0,012 |

Продолжение табл. 31.36

| Толщина пленки, нм | $\rho_\lambda$ при $\lambda$ , нм |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 253,6                             | 275,3 | 296,7 | 334,1 | 361,0 | 404,6 | 435,8 | 480,0 | 508,5 | 546,1 | 578,0 | 643,8 |
| 5                  | 0,130                             | 0,135 | 0,133 | 0,126 | 0,129 | 0,122 | 0,117 | 0,109 | 0,108 | 0,120 | 0,139 | 0,172 |
| 10                 | 0,207                             | 0,210 | 0,207 | 0,195 | 0,190 | 0,181 | 0,167 | 0,145 | 0,145 | 0,172 | 0,205 | 0,273 |
| 20                 | 0,272                             | 0,303 | 0,301 | 0,289 | 0,285 | 0,278 | 0,259 | 0,223 | 0,231 | 0,300 | 0,366 | 0,478 |
| 30                 | 0,300                             | 0,323 | 0,330 | 0,329 | 0,335 | 0,333 | 0,321 | 0,286 | 0,315 | 0,418 | 0,493 | 0,593 |
| 40                 | 0,269                             | 0,301 | 0,316 | 0,322 | 0,342 | 0,352 | 0,345 | 0,324 | 0,369 | 0,489 | 0,567 | 0,660 |
| 50                 | 0,253                             | 0,279 | 0,274 | 0,294 | 0,331 | 0,349 | 0,346 | 0,338 | 0,402 | 0,530 | 0,605 | 0,683 |
| 60                 | 0,232                             | 0,259 | 0,265 | 0,276 | 0,320 | 0,339 | 0,339 | 0,338 | 0,414 | 0,550 | 0,622 | 0,674 |
| 70                 | 0,223                             | 0,255 | 0,261 | 0,264 | 0,306 | 0,320 | 0,328 | 0,333 | 0,422 | 0,557 | 0,623 | 0,675 |
| 85                 | 0,218                             | 0,248 | 0,250 | 0,253 | 0,294 | 0,315 | 0,322 | 0,332 | 0,426 | 0,569 | 0,627 | 0,668 |
| 95                 | 0,212                             | 0,248 | 0,249 | 0,243 | 0,256 | 0,302 | 0,308 | 0,327 | 0,431 | 0,580 | 0,629 | 0,679 |

Таблица 31.37. Спектральный коэффициент отражения пленок серебра при температуре от 291 до 295 К [20]

Пленки получены испарением при давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па на кварцевые полированные подложки. Угол падения потока излучения  $0^\circ$ . Погрешность измерения  $\pm 2\%$

| $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ | $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ | $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 251            | 0,340          | 338            | 0,555          | 500            | 0,913          |
| 288            | 0,212          | 357            | 0,744          | 589            | 0,950          |
| 305            | 0,091          | 385            | 0,814          | 700            | 0,960          |
| 316            | 0,042          | 420            | 0,866          | 1000           | 0,970          |
| 326            | 0,146          | 450            | 0,905          | 1100           | 0,975          |

Таблица 31.38. Спектральный коэффициент отражения пленок палладия и родия при температуре от 291 до 295 К [20]

Пленки получены испарением при давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па на стеклянные подложки. Угол падения потока излучения  $0^\circ$ . Погрешность измерения  $\pm 2\%$

| $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ |      | $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ |      |
|----------------|----------------|------|----------------|----------------|------|
|                | Pd             | Rh   |                | Pd             | Rh   |
| 200            | 0,25           | —    | 800            | 0,70           | 0,82 |
| 300            | 0,43           | 0,67 | 900            | 0,70           | 0,83 |
| 400            | 0,55           | 0,75 | 1000           | 0,70           | 0,84 |
| 500            | 0,63           | 0,78 | 1100           | 0,71           | 0,85 |
| 600            | 0,67           | 0,80 | 1200           | 0,72           | 0,85 |
| 700            | 0,68           | 0,81 | 2000           | —              | 0,91 |

Таблица 31.39. Спектральный коэффициент теплового излучения легкоплавких металлов [46]

Ртуть — очищенная. Образцы других металлов — полированные, неокисленные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| Металл    | T, К    | $\epsilon_{\lambda}^n$ при $\lambda$ , мкм |       |       |       |       |       |       |  |
|-----------|---------|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|           |         | 2                                          | 3     | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    |  |
| Олово     | 293     | 0,083                                      | 0,068 | 0,059 | 0,049 | 0,040 | 0,036 | 0,031 |  |
|           | 400     | 0,098                                      | 0,080 | 0,070 | 0,057 | 0,050 | 0,045 | 0,041 |  |
|           | 500     | —                                          | 0,090 | 0,080 | 0,065 | 0,057 | 0,050 | 0,047 |  |
| Ртуть     | 273—293 | —                                          | 0,17  | 0,16  | 0,13  | 0,11  | 0,10  | 0,090 |  |
| Свинец    | 293     | 0,11                                       | 0,090 | 0,080 | 0,065 | 0,057 | 0,051 | 0,048 |  |
|           | 400     | 0,13                                       | 0,11  | 0,093 | 0,078 | 0,067 | 0,061 | 0,007 |  |
|           | 600     | 0,16                                       | 0,13  | 0,12  | 0,096 | 0,084 | 0,077 | 0,069 |  |
| Сурьма    | 293     | 0,095                                      | 0,079 | 0,069 | 0,055 | 0,047 | 0,041 | 0,039 |  |
|           | 400     | 0,11                                       | 0,090 | 0,080 | 0,066 | 0,057 | 0,050 | 0,046 |  |
|           | 500     | 0,12                                       | 0,10  | 0,088 | 0,073 | 0,062 | 0,055 | 0,050 |  |
|           | 600     | 0,13                                       | 0,11  | 0,095 | 0,078 | 0,070 | 0,060 | 0,055 |  |
|           | 700     | 0,14                                       | 0,12  | 0,10  | 0,084 | 0,075 | 0,066 | 0,060 |  |
|           | 800     | 0,15                                       | 0,12  | 0,11  | 0,089 | 0,078 | 0,072 | 0,065 |  |
|           | 900     | 0,16                                       | 0,13  | 0,11  | 0,095 | 0,084 | 0,076 | 0,070 |  |
|           |         |                                            |       |       |       |       |       |       |  |
| Цинк [24] | 293     | 0,051                                      | 0,045 | 0,043 | 0,039 | 0,039 | 0,038 | 0,037 |  |
|           | 500     | 0,061                                      | 0,053 | 0,050 | 0,043 | 0,043 | 0,043 | 0,042 |  |
|           | 700     | 0,072                                      | 0,060 | 0,055 | 0,049 | 0,047 | 0,046 | 0,045 |  |

Таблица 31.40. Коэффициент теплового излучения черных металлов

Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| Материал                                                                                                   | Состояние излучающей поверхности | T, К    | $\epsilon_T^n$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------|----------------|
| Железо [19]                                                                                                | Полированная                     | 200     | 0,081          |
|                                                                                                            |                                  | 300     | 0,101          |
|                                                                                                            |                                  | 500     | 0,139          |
|                                                                                                            |                                  | 700     | 0,177          |
|                                                                                                            |                                  | 900     | 0,216          |
|                                                                                                            |                                  | 1100    | 0,254          |
| Сталь:<br>мягкая углеродистая [20]<br>низкоуглеродистая [20]<br>20X23H18 [19]<br>12X18H9T [19]<br>1X18H10T | Полированная                     | 290     | 0,10           |
|                                                                                                            | »                                | 300     | 0,10           |
|                                                                                                            | Окисленная                       | 300     | 0,47           |
|                                                                                                            | Электрополированная              | 290—300 | 0,13           |
|                                                                                                            | »                                | 400     | 0,16           |
|                                                                                                            | »                                | 800     | 0,26           |
|                                                                                                            | »                                | 1200    | 0,37           |
|                                                                                                            | Полированная пастой ГОИ          | 293     | 0,19           |

Продолжение табл. 31.40

| Материал   | Состояние излучающей поверхности   | T, К         | $\epsilon_T^n$ |
|------------|------------------------------------|--------------|----------------|
| 07X16H6    | Шлифованная порошками М7-М40       | 293          | 0,26—0,31      |
|            | Полированная                       | 300          | 0,15           |
|            | Окисленная                         | 300          | 0,70           |
|            | »                                  | 900          | 0,85           |
| 08X18H12Б  | »                                  | 1100         | 0,87           |
|            | Зеркально полированная             | 290          | 0,19           |
|            |                                    | 300          | 0,20           |
| Чугун [19] | Полированная                       | 473          | 0,21           |
|            | Полированная, окисленная при 873 К | { 473<br>873 | { 0,64<br>0,78 |
|            | Шероховатая, окисленная при 1073 К | 523          | 0,95           |
|            |                                    |              |                |

Таблица 31.41. Коэффициент теплового излучения и поглощения солнечного излучения терморегулирующих покрытий из чередующихся слоев металлов и диэлектриков [20]

Погрешность измерения  $\pm 7\%$

| Тип покрытия                             | Материал подложки       | $\epsilon_T$ | $\alpha_S$ |
|------------------------------------------|-------------------------|--------------|------------|
| CeO <sub>2</sub> —Mo—CeO <sub>2</sub>    | Молибден                | 0,06         | 0,90       |
| CeO <sub>2</sub> —Mo—CeO <sub>2</sub>    | Слой алюминия на стекле | 0,07         | 0,90       |
| CeO <sub>2</sub> —Mo—CeO <sub>2</sub>    | Сталь 12X18H10T         | 0,18         | 0,85       |
| Mo—CeO <sub>2</sub>                      | Слой алюминия на стекле | 0,06         | 0,90       |
| Mo—SiO <sub>2</sub>                      | То же                   | 0,06         | 0,90       |
| Ni—SiO <sub>2</sub> —Ni—SiO <sub>2</sub> | Стекло                  | 0,10         | 0,92       |
| SiO—Al—SiO                               | »                       | 0,08         | 0,89       |
| SiO <sub>2</sub> —Mo—SiO <sub>2</sub>    | Молибден                | 0,08         | 0,85       |
| SiO <sub>2</sub> —Mo—SiO <sub>2</sub>    | Слой алюминия на стекле | 0,08         | 0,85       |
| SiO <sub>2</sub> —Mo—SiO <sub>2</sub>    | Сталь 12X18H10T         | 0,15         | 0,85       |
| ZnS—Al—ZnS                               | Стекло                  | 0,16         | —          |
| ZnS—Cu—ZnS                               | »                       | 0,11         | —          |
| ZnS—Ni—ZnS                               |                         | 0,06         | 0,85       |

### 31.7. ГРАФИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.42. Спектральный коэффициент отражения  $\rho_\lambda$  и спектральные коэффициенты теплового излучения  $\epsilon_\lambda$  графитов

| $\lambda$ , мкм | Углеродистый*<br>при $T=291$ К [49] | Электрографит**<br>при $T=1460$ К [50] | Реакторный гра-<br>фит ** при $T=$<br>$=1860$ К [50] |
|-----------------|-------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                 | $\rho_\lambda$                      | $\epsilon_\lambda^n$                   | $\epsilon_\lambda^n$                                 |
| 0,5             | 0,14                                | 0,86                                   | 0,87                                                 |
| 1,0             | 0,16                                | 0,83                                   | 0,84                                                 |
| 1,5             | 0,18                                | 0,87                                   | 0,87                                                 |
| 2,0             | 0,19                                | 0,87                                   | 0,90                                                 |
| 2,5             | 0,21                                | 0,85                                   | 0,90                                                 |
| 3,0             | 0,22                                | 0,85                                   | 0,89                                                 |
| 3,5             | 0,23                                | 0,82                                   | 0,89                                                 |
| 4,0             | 0,25                                | 0,83                                   | 0,89                                                 |
| 4,5             | —                                   | 0,82                                   | 0,85                                                 |
| 5,0             | —                                   | 0,85                                   | 0,80                                                 |

\*1 Образцы компактные, обожженные. Погрешность измерения  $\pm 5\%$ .

\*2 Образцы трубчатые. Поверхность неокисленная. Погрешность измерения  $\pm 10\%$ .

\*3 Образцы трубчатые. Поверхность пористая, неокисленная;  $d=1700$  кг/м<sup>3</sup> при  $T=283$  К. Погрешность измерения  $\pm 10\%$ .

Таблица 31.43. Коэффициенты теплового излучения и спектральные коэффициенты теплового излучения графитов ( $\lambda=0,65 \div 0,66$  мкм)

| $T$ , К | Углеродистый [49] | Графит РВ [51]    | Графит ГМЗ [51]         | Реакторный графит [50] |                         | Электрографит [50] |                         |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
|         | $\epsilon_T^{*1}$ | $\epsilon_T^{*2}$ | $\epsilon_\lambda^{*2}$ | $\epsilon_T^{*3}$      | $\epsilon_\lambda^{*3}$ | $\epsilon_T^{*4}$  | $\epsilon_\lambda^{*4}$ |
| 400     | 0,74              | —                 | —                       | —                      | —                       | —                  | —                       |
| 600     | 0,76              | —                 | —                       | —                      | —                       | —                  | —                       |
| 800     | 0,76              | —                 | —                       | —                      | —                       | —                  | —                       |
| 1000    | 0,77              | —                 | —                       | 0,87                   | 0,91                    | 0,86               | 0,84                    |
| 1200    | 0,77              | 0,76              | 0,89                    | 0,86                   | 0,90                    | 0,84               | 0,82                    |
| 1400    | 0,78              | 0,78              | 0,89                    | 0,86                   | 0,88                    | 0,82               | 0,80                    |
| 1600    | 0,78              | 0,79              | 0,89                    | 0,86                   | 0,86                    | 0,80               | 0,79                    |
| 1800    | 0,78              | 0,80              | 0,88                    | 0,86                   | 0,85                    | 0,78               | 0,77                    |
| 2000    | 0,78              | 0,82              | 0,88                    | 0,86                   | 0,84                    | 0,76               | 0,76                    |
| 2200    | 0,78              | —                 | 0,88                    | 0,86                   | 0,83                    | —                  | —                       |
| 2400    | 0,78              | —                 | 0,87                    | 0,86                   | 0,81                    | —                  | —                       |
| 2600    | —                 | —                 | 0,88                    | 0,85                   | 0,80                    | —                  | —                       |
| 2800    | —                 | —                 | —                       | 0,84                   | 0,79                    | —                  | —                       |

\*1 Образцы компактные, обожженные. Погрешность измерения  $\pm 10\%$ .

\*2 Образцы цилиндрические; поверхность полированная, неокисленная. Погрешность измерения  $\pm 6-10\%$ .

\*3 Образцы трубчатые. Поверхность пористая, неокисленная;  $d=1700$  кг/м<sup>3</sup> при 293 К. Погрешность измерения  $\pm 10-12\%$ .

\*4 Образцы трубчатые. Поверхность неокисленная. Погрешность измерения  $\pm 10\%$ .

Таблица 31.44. Спектральный коэффициент отражения пиролитического графита при температуре 293 К [49]

| $\lambda$ , нм | $\rho_\lambda$ при высоте неровностей на отражающей поверхности, мкм |           |       |       |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------|
|                | 5—7,5                                                                | 0,75—1,75 | 1—1,5 | 0,1   |
| 400            | 0,190                                                                | 0,145     | 0,089 | 0,075 |
| 665            | 0,210                                                                | 0,160     | 0,092 | 0,080 |
| 700            | 0,215                                                                | 0,165     | 0,093 | 0,082 |

Таблица 31.45. Спектральный коэффициент  $\epsilon_\lambda^n$  теплового излучения углепластика и стеклоуглерода при температуре от 291 до 293 К [52]

Погрешность измерения  $\pm 8\%$

| $\lambda$ , мкм | Углепластик КУПВМ, шероховатый | Стеклоуглерод СУ-2500, полированный |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 0,63            | 0,92                           | 0,81                                |
| 1,15            | 0,79                           | 0,73                                |
| 3,39            | 0,72                           | 0,66                                |
| 10,6            | 0,79                           | 0,50                                |

Таблица 31.46. Коэффициент теплового излучения  $\epsilon_T$  различных видов сажи [20]

Погрешность измерения  $\pm 10\%$

| $T$ , К | Вид сажи     |                 |                                  |          |               |          |
|---------|--------------|-----------------|----------------------------------|----------|---------------|----------|
|         | Ацетиленовая | Каменноугольная | Каменноугольная с жидким стеклом | Ламповая | Скандинавская | Угольная |
| 90      | —            | 0,930           | 0,960                            | —        | —             | —        |
| 100     | —            | 0,925           | 0,958                            | —        | —             | —        |
| 120     | 0,790        | 0,920           | 0,955                            | —        | —             | 0,760    |
| 140     | 0,785        | —               | 0,955                            | —        | —             | 0,805    |
| 160     | 0,777        | —               | 0,954                            | —        | —             | 0,820    |
| 180     | 0,768        | —               | 0,953                            | —        | —             | 0,835    |
| 200     | 0,765        | —               | 0,953                            | —        | 0,950         | 0,845    |
| 220     | 0,764        | —               | 0,952                            | —        | 0,950         | 0,865    |
| 240     | 0,763        | —               | 0,951                            | —        | 0,951         | 0,902    |
| 260     | 0,762        | —               | 0,951                            | 0,942    | 0,951         | 0,920    |
| 280     | 0,761        | —               | 0,950                            | 0,944    | 0,952         | 0,940    |
| 300     | 0,760        | —               | 0,950                            | 0,948    | 0,952         | 0,960    |

### 31.8. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.47. Оптические характеристики органических стекол [30]

| Характеристика                                  | Метилметакрилат | Поливинилхлорид | Полихлорстирол |
|-------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| $n$ для $\lambda$ , нм:                         |                 |                 |                |
| 404,7                                           | 1,5049          | 1,6271          | 1,6507         |
| 486,1                                           | 1,49628         | 1,60574         | 1,62833        |
| 589,3                                           | 1,49029         | 1,59194         | 1,61400        |
| 656,3                                           | 1,4878          | 1,58655         | 1,60838        |
| 1000                                            | 1,4815          | 1,5738          | 1,5957         |
| $\beta$ , $10^{-5}$ 1/К, для $\lambda=589,3$ нм | —16             | —               | —11            |



Таблица 31.48. Спектральный коэффициент внутреннего пропускания  $\tau_{\lambda 1}^*$  полимерных материалов толщиной 1 мм при температуре 293 К [20]

Образцы — полированные диски. Погрешность измерений  $\pm 10\%$

| $\lambda$ , мкм | Ацетицеллюлоза | Ацетобутират-целлюлоза белая | Полиамид ПК-4 | Поликарбонат [53] | Полиметилметакрилат | Политрифторхлорэтилен | Полиэтилентерефталат ПЭТФ | Тетрафлон | Этилцеллюлоза |
|-----------------|----------------|------------------------------|---------------|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|-----------|---------------|
| 0,40            | 0,0081—0,041   | 0,0185                       | 0,208         | 0,563             | —                   | —                     | 0,0345                    | —         | 0,0081—0,041  |
| 0,50            | 0,0081—0,041   | 0,0206                       | 0,208         | 0,723             | —                   | 0,843                 | 0,0179                    | —         | 0,0081—0,041  |
| 0,60            | 0,0081—0,041   | 0,0206                       | 0,208         | 0,723             | —                   | —                     | 0,0179                    | —         | 0,0081—0,041  |
| 0,70            | 0,0081—0,041   | 0,0206                       | 0,249         | 0,706             | —                   | —                     | 0,0345                    | —         | 0,0081—0,041  |
| 0,80            | —              | —                            | —             | 0,672             | —                   | —                     | —                         | —         | —             |
| 1,0             | —              | —                            | —             | —                 | 0,364               | 0,936                 | —                         | —         | —             |
| 1,5             | —              | —                            | —             | —                 | 0,364               | 0,940                 | —                         | —         | —             |
| 2,0             | —              | —                            | —             | —                 | 0,364               | 0,947                 | —                         | 0,0134    | —             |
| 3,0             | —              | —                            | —             | —                 | 0,130               | 0,834                 | —                         | 0,0625    | —             |
| 4,0             | —              | —                            | —             | —                 | 0,218               | 0,464                 | —                         | 0,0081    | —             |
| 5,0             | —              | —                            | —             | —                 | 0,364               | 0,604                 | —                         | 0,0625    | —             |

Таблица 31.49. Оптические характеристики пластифицированного и неластифицированного органического стекла [23]

| Т, К | $\lambda$ , мкм | Пластифицированное стекло марки СОЛ |                      | Неластифицированное стекло марки СТ-1 |                      |
|------|-----------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|
|      |                 | $n$                                 | $\tau_{\lambda 1}^*$ | $n$                                   | $\tau_{\lambda 1}^*$ |
| 291  | 0,300           | —                                   | 0,11                 | —                                     | —                    |
| 291  | 0,320           | —                                   | 0,53                 | —                                     | —                    |
| 291  | 0,340           | —                                   | 0,76                 | —                                     | 0,11                 |
| 291  | 0,360           | —                                   | 0,86                 | —                                     | 0,85                 |
| 291  | 0,380           | —                                   | 0,88                 | —                                     | 0,89                 |
| 291  | 0,400           | —                                   | 0,89                 | —                                     | 0,90                 |
| 294  | 0,589           | 1,492                               | 0,89                 | 1,489                                 | 0,85                 |
| 318  | 0,589           | 1,488                               | 0,90                 | 1,486                                 | 0,84                 |
| 333  | 0,589           | 1,486                               | 0,90                 | 1,484                                 | 0,84                 |
| 291  | 0,750           | —                                   | 0,92                 | —                                     | 0,80                 |
| 291  | 0,800           | —                                   | 0,90                 | —                                     | 0,92                 |
| 291  | 1,00            | —                                   | 0,90                 | —                                     | 0,92                 |
| 291  | 1,20            | —                                   | 0,61                 | —                                     | 0,90                 |
| 291  | 1,40            | —                                   | 0,60                 | —                                     | 0,60                 |
| 291  | 1,60            | —                                   | 0,70                 | —                                     | 0,69                 |
| 291  | 2,00            | —                                   | 0,47                 | —                                     | 0,45                 |

Таблица 31.50. Показатель преломления полимерных материалов при 291—293 К для длины волны 589,1 нм [55]

| Материал         | $n$       | Материал          | $n$         |
|------------------|-----------|-------------------|-------------|
| Аминопласт       | 1,55—1,62 | Стирол            | 1,61—1,67   |
| Ацетицеллюлоза   | 1,47—1,50 | Фенолформальдегид | 1,54—1,70   |
| Винилацетат      | 1,473     | Формальдегид      | 1,57—1,65   |
| Винилхлорид      | 1,52—1,53 | Крезольный кислый | —           |
| Метакрилат       | 1,50—1,52 | Целлулоид         | 1,495—1,520 |
| Метилметакрилат  | 1,49      | —                 | —           |
| Полидихлорстирол | 1,61      | —                 | —           |
| Полистирол       | 1,59—1,61 | —                 | —           |

Таблица 31.51. Спектральный коэффициент внутреннего пропускания  $\tau_{\lambda}^*$  полимерных материалов, подвергаемых ультрафиолетовому облучению [20]

Облучение имитирует воздействие заатмосферного солнечного излучения длительностью 100 ч. Образцы — полированные пластины толщиной 30 мкм. Измерения при температуре 293 К. Погрешность измерений  $\pm 5\%$

| $\lambda$ , мкм | Поликарбонат |                 | Полиэтилентерефталат |                 |
|-----------------|--------------|-----------------|----------------------|-----------------|
|                 | до облучения | после облучения | до облучения         | после облучения |
| 0,40            | 0,87         | 0,63            | 0,84                 | 0,28            |
| 0,45            | 0,87         | 0,68            | 0,85                 | 0,32            |
| 0,50            | 0,88         | 0,70            | 0,86                 | 0,38            |
| 0,60            | 0,89         | 0,76            | 0,87                 | 0,50            |
| 0,70            | 0,90         | 0,79            | 0,87                 | 0,57            |
| 0,80            | 0,90         | 0,83            | 0,88                 | 0,62            |
| 1,0             | 0,90         | 0,84            | 0,89                 | 0,66            |

### 31.9 СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.52. Коэффициент поглощения солнечного излучения для строительных материалов [20]

Измерения при температуре от 290 до 300 К. Погрешность измерений  $\pm 10\%$

| Материал                | $\alpha_s$ | Материал                         | $\alpha_s$ |
|-------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| Алебастр                | 0,31       | красками:                        | —          |
| Асбоцемент:             | —          | белой                            | 0,35       |
| серый                   | 0,66       | зеленой                          | 0,59       |
| белый                   | 0,41       | голубой                          | 0,48       |
| Асбошифер               | 0,75       | темно-зеленой                    | 0,74       |
| Бетон:                  | —          | покрашенный цементными красками: | —          |
| неокрашенный            | 0,55       | голубой                          | 0,67       |
| покрашенный силикатными | —          | розовой                          | 0,56       |

| Материал           | $\alpha_s$ | Материал            | $\alpha_s$ | Материал         | $\alpha_s$ | Материал       | $\alpha_s$ |
|--------------------|------------|---------------------|------------|------------------|------------|----------------|------------|
| светло-зеленой     | 0,66       | Кирпич:             |            | Фарфор           | 0,52       | клеевая        | 0,40       |
| темно-зеленой      | 0,68       | белый               | 0,33       | Фибролит цемент- | 0,79       | розовая        | 0,52       |
| Гипс неполирован-  | 0,25       | красный             | 0,48       | ный              |            | светло-голубая | 0,53       |
| ный                |            | Мипора чистая белая | 0,16       | Черепица:        |            | Штукатурка:    |            |
| Древесноволокнист- | 0,68       | Мрамор:             |            | коричневая       | 0,74       | светло-желтая  | 0,48       |
| тая плита бес-     |            | белый               | 0,42       | красная          | 0,67       | силикатная     | 0,78       |
| цветная, без от-   |            | темный              | 0,68       | Штукатурка:      |            | темно-серая    | 0,75       |
| делки              |            | Руберонд            | 0,93       | известковая      | 0,50       | цементная сос- |            |
| Древесностружеч-   | 0,43       | Стекловолокно       | 0,56       | известковая бе-  | 0,30       | тава:          |            |
| ная плита эк-      |            | Стеклоткань         | 0,42       | лая              |            | 1 : 3          | 0,66       |
| струкционная       |            |                     |            |                  |            | 1 : 5          | 0,64       |

Таблица 31.53. Спектральный коэффициент отражения строительных материалов при температуре 293 К [20]  
Погрешность измерений  $\pm 10\%$

| Материал                           | $\rho_\lambda$ для $\lambda$ , мкм |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                    | 0,50                               | 0,75 | 1,0  | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 5,0  | 6,0  | 7,0  | 8,0  | 9,0  |
| Бетон:                             |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| неокрашенный                       | 0,37                               | 0,43 | 0,42 | 0,30 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,32 | 0,16 | 0,19 |
| окрашенный цементной голубой крас- | 0,36                               | 0,41 | 0,51 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| кой                                |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| окрашенный цементной зеленой крас- | 0,26                               | 0,28 | 0,43 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| кой                                |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Древесноволокнистые плиты:         |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| напрессованные поливинилхлоридной  | 0,08                               | 0,11 | 0,25 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| пленкой                            |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| окрашенные белой эмалью            | 0,71                               | 0,72 | 0,75 | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| Песок сухой очищенный              | —                                  | —    | 0,40 | 0,50 | 0,54 | —    | —    | —    | —    | —    | —    |
| Фарфор:                            |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| глазурованный                      | 0,43                               | —    | 0,30 | 0,25 | 0,16 | 0,15 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,05 |
| неглазурованный                    | 0,53                               | —    | 0,38 | 0,33 | 0,20 | 0,24 | 0,08 | 0,08 | 0,05 | 0,10 | 0,50 |
| Шамот белый                        | 0,92                               | —    | 0,95 | 0,90 | 0,40 | 0,62 | 0,25 | 0,12 | 0,08 | 0,16 | 0,42 |
| Штукатурка гипсовая                | 0,82                               | 0,85 | 0,84 | 0,52 | 0,08 | 0,37 | 0,25 | 0,12 | 0,17 | 0,08 | 0,06 |

Таблица 31.54. Коэффициент теплового излучения строительных материалов [55]

| Материал                   | T, К     | $\epsilon_T^n$ | Материал                   | T, К    | $\epsilon_T^n$ |
|----------------------------|----------|----------------|----------------------------|---------|----------------|
| Асбест                     | 293      | 0,96           | Мрамор серый полированный  | 293     | 0,932          |
| Асбошифер                  | 293      | 0,96           | Руберонд                   | 293     | 0,93           |
| Асфальт                    | 298—303  | 0,95           | Стекло оконное:            |         |                |
| Бетон                      | 293      | 0,92           | гладкое                    | 298—303 | 0,91           |
| Гипс неполированный        | 293      | 0,903          | матовое                    | 293     | 0,96           |
| Глина обожженная           | 303      | 0,91           | Толь кровельный            | 293     | 0,91—0,93      |
| Дерево строганое           | 293      | 0,8—0,9        | Цемент                     | 300     | 0,54           |
| Древесные опилки (хвойные) | 298—303  | 0,96           | Штукатурка шероховатая из- | 283—363 | 0,91           |
| Кирпич:                    |          |                | вестковая                  |         |                |
| красный неполированный     | 293      | 0,932          |                            |         |                |
| огнеупорный                | 773—1273 | 0,65—0,75      |                            |         |                |
| шамотный                   | 293      | 0,85           |                            |         |                |
|                            | 1273     | 0,75           |                            |         |                |
|                            | 1503     | 0,59           |                            |         |                |

### 31.10. ОКСИДЫ, БОРИДЫ, КАРБИДЫ И НИТРИДЫ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Продолжение табл. 31.55

Таблица 31.55. Коэффициент теплового излучения  
 $\epsilon_T$  тугоплавких оксидов [51]

Погрешность измерений  $\pm 10\%$

| $T, K$ | $Al_2O_3$ | $MgO$ | $ZrO_2$ |
|--------|-----------|-------|---------|
| 1200   | 0,35      | 0,33  | —       |
| 1300   | 0,36      | 0,28  | 0,39    |
| 1400   | 0,37      | 0,28  | 0,42    |

| $T, K$ | $Al_2O_3$ | $MgO$ | $ZrO_2$ |
|--------|-----------|-------|---------|
| 1500   | 0,38      | 0,30  | 0,45    |
| 1600   | 0,39      | 0,34  | 0,47    |
| 1700   | 0,40      | 0,38  | 0,48    |
| 1800   | —         | 0,43  | 0,49    |

Таблица 31.56. Коэффициент теплового излучения боридов, карбидов и нитридов тугоплавких  
и редкоземельных металлов [18]

Погрешность измерений  $\pm 10\%$

| Материал    | $\alpha_T$ при температуре, $K$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | 1100                            | 1300 | 1500 | 1700 | 1900 | 2100 | 2300 | 2500 | 2700 | 2900 |
| Борид:      |                                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| гадолиния   | 0,61                            | 0,62 | 0,62 | 0,63 | 0,64 | —    | —    | —    | —    | —    |
| гафния      | 0,85                            | 0,87 | 0,89 | 0,92 | 0,94 | —    | —    | —    | —    | —    |
| иттрия      | 0,63                            | 0,65 | 0,66 | 0,67 | 0,68 | —    | —    | —    | —    | —    |
| лантана     | 0,68                            | 0,69 | 0,69 | 0,70 | 0,71 | —    | —    | —    | —    | —    |
| неодима     | 0,56                            | 0,56 | 0,58 | 0,58 | 0,59 | —    | —    | —    | —    | —    |
| самария     | 0,71                            | 0,70 | 0,69 | 0,68 | 0,67 | —    | —    | —    | —    | —    |
| циркония    | 0,86                            | 0,88 | 0,91 | 0,91 | 0,95 | —    | —    | —    | —    | —    |
| Карбид:     |                                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| бора        | 0,84                            | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | —    | —    | —    | —    | —    |
| вольфрама   | —                               | —    | 0,20 | 0,22 | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | —    |
| ниобия      | 0,41                            | 0,42 | 0,43 | 0,45 | 0,43 | 0,44 | 0,45 | 0,46 | 0,47 | 0,48 |
| тантала     | —                               | —    | 0,20 | 0,22 | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | —    |
| титана      | 0,85                            | 0,86 | 0,87 | 0,87 | 0,89 | —    | —    | —    | —    | —    |
| циркония    | —                               | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,74 | 0,72 | 0,70 | 0,68 | 0,66 | 0,64 |
| Нитрид бора | 0,58                            | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | —    | —    | —    | —    | —    |

Таблица 31.57. Спектральный коэффициент  
теплового излучения оксидов металлов и сплавов для  
длины волны 0,65 мкм [56]

Образцы — диски с гладкой окисленной поверхностью.  
Погрешность измерений 10—15%

| Окисленный материал | $\epsilon_{\lambda}^n$ | Окисленный материал  | $\epsilon_{\lambda}^n$ |
|---------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Алюмель             | 0,87                   | Сталь:               |                        |
| Алюминий            | 0,30                   | нержавеющая          | 0,80                   |
| Бериллий            | 0,35                   | углеродистая         | 0,85                   |
| Ванадий             | 0,70                   | Титан                | 0,50                   |
| Железо              | 0,70                   | Торий                | 0,50                   |
| Иттрий              | 0,60                   | Уран                 | 0,30                   |
| Кобальт             | 0,75                   | Хром                 | 0,70                   |
| Константан          | 0,84                   | Хромель:             |                        |
| Магний              | 0,20                   | 90 Ni — 10 Cr        | 0,87                   |
| Медь                | 0,70                   | 80 Ni — 20 Cr        | 0,90                   |
| Никель              | 0,90                   | 60 Ni — 24 Fe — 16Cr | 0,83                   |
| Ниобий              | 0,70                   | Цирконий             | 0,40                   |
|                     |                        | Чугун                | 0,70                   |

### 31.11. ЗЕМНЫЕ ПОКРОВЫ И ПРИРОДНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Таблица 31.58. Спектральный коэффициент  
отражения  $\rho_{\lambda}$  различных почв [19]

| $\lambda, \text{мкм}$ | Глина жирная | Земля  |            |         | Песок желтый |
|-----------------------|--------------|--------|------------|---------|--------------|
|                       |              | желтая | коричневая | красная |              |
| 0,4                   | 0,08         | 0,08   | 0,08       | 0,06    | 0,15         |
| 0,5                   | 0,12         | 0,18   | 0,12       | 0,07    | 0,27         |
| 0,6                   | 0,17         | 0,32   | 0,17       | 0,18    | 0,36         |
| 0,7                   | 0,20         | 0,53   | 0,20       | 0,28    | 0,44         |
| 0,8                   | 0,18         | 0,67   | 0,21       | 0,30    | 0,50         |
| 0,9                   | 0,17         | 0,76   | 0,23       | 0,33    | 0,54         |
| 1,0                   | 0,20         | 0,81   | 0,20       | —       | 0,58         |

Примечание. Для суглинка сухого и чернозема сухого средние значения  $\rho_{\lambda}$  в диапазоне длин волн 0,4 — 0,7 мкм составляют 0,15 и 0,7 соответственно.

Таблица 31.59. Спектральный коэффициент отражения  $\rho_\lambda$  различных видов растительности [19]

| $\lambda$ , мкм | Листья         |              |                  | Солома | Трава  |       |
|-----------------|----------------|--------------|------------------|--------|--------|-------|
|                 | свежая зеленая | сухая желтая | сухая коричневая |        | свежая | сухая |
| 0,4             | 0,10           | 0,04         | 0,04             | 0,10   | 0,04   | 0,10  |
| 0,5             | 0,21           | 0,08         | 0,08             | 0,20   | 0,08   | 0,18  |
| 0,6             | 0,32           | 0,22         | 0,15             | 0,27   | 0,19   | 0,27  |
| 0,7             | 0,40           | 0,37         | 0,23             | 0,33   | 0,20   | 0,30  |
| 0,8             | 0,49           | 0,43         | 0,38             | 0,38   | 0,50   | 0,35  |
| 0,9             | 0,55           | 0,48         | 0,52             | 0,44   | 0,69   | 0,40  |
| 1,0             | 0,58           | 0,50         | 0,60             | 0,48   | 0,76   | 0,43  |

Примечание. Для хвой среднее значение  $\rho_\lambda$  в диапазоне длин волн 0,7—1 мкм равно 0,30.

Таблица 31.60. Показатель преломления природных драгоценных и полудрагоценных камней для длины волны 589,3 нм [54]

| Материал        | $n_o$       | $n_e$       | $n_1-n_2$<br>[56]*1 |
|-----------------|-------------|-------------|---------------------|
| Алмаз белый     | 2,417       | —           | 0,044               |
| Берилл          | 1,571—1,599 | 1,566—1,590 | —                   |
| Изумруд         | 1,588—1,595 | 1,581—1,588 | 0,014               |
| Сапфир:         |             |             |                     |
| белый           | 1,768—1,771 | 1,759—1,761 | —                   |
| зеленый         | 1,770—1,779 | 1,762—1,770 | 0,018               |
| рубиновый       | 1,768—1,778 | 1,760—1,769 | —                   |
| Турмалин        | 1,669       | 1,638       | 0,017               |
| Хрусталь горный | 1,544       | 1,553       | 0,013               |
| Материал        | $n_p$       | $n_m$       | $n_G$               |
| Бирюза          | —           | 1,62        | 1,65                |
| Малахит         | —           | 1,66        | 1,91                |
| Топаз           | 1,630       | 1,631       | 1,638               |

\*1 Приведены значения  $n_1$  для  $\lambda = 687,0$  мкм и  $n_2$  для  $\lambda = 430,8$  мкм.

Таблица 31.61. Показатель преломления белого алмаза в видимой области спектра [54]

| $\lambda$ , нм | $n$   | $\lambda$ , нм | $n$   |
|----------------|-------|----------------|-------|
| 400            | 2,465 | 600            | 2,416 |
| 450            | 2,446 | 650            | 2,411 |
| 500            | 2,433 | 700            | 2,407 |
| 550            | 2,423 | 750            | 2,404 |

## 31.12. ЛУННЫЕ ГРУНТЫ

Таблица 31.62. Коэффициент теплового излучения лунного грунта из района Моря Изобилия [58]

Образцы с насыпной плотностью 1900 кг/м³; поверхность насыпки сглажена. Погрешность измерений  $\pm 1\%$

| $T$ , К | $\epsilon_T$ | $T$ , К | $\epsilon_T$ |
|---------|--------------|---------|--------------|
| 90      | 0,9764       | 200     | 0,9743       |
| 120     | 0,9763       | 240     | 0,9706       |
| 160     | 0,9758       | 270     | 0,9660       |
|         |              | 300     | 0,9603       |

Таблица 31.63. Спектральный коэффициент теплового излучения лунного грунта из района Моря Изобилия [58]

Образцы с насыпной плотностью, кг/м³: I — 1400; II — 1600—1700; III — 1900; поверхность насыпки сглажена

| $\lambda$ , мкм | $\epsilon_\lambda^n$ |      |      | $\lambda$ , мкм | $\epsilon_\lambda^n$ |      |      |
|-----------------|----------------------|------|------|-----------------|----------------------|------|------|
|                 | I [58]               | II   | III  |                 | I [58]               | II   | III  |
| 2,5             | 0,82                 | 0,78 | 0,73 | 10              | 0,97                 | 0,97 | 0,97 |
| 4,0             | 0,77                 | 0,75 | 0,72 | 12              | 0,97                 | 0,97 | 0,97 |
| 6,0             | 0,98                 | 0,86 | 0,84 | 14              | 0,98                 | 0,98 | 0,98 |
| 8,0             | 0,97                 | 0,97 | 0,97 |                 |                      |      |      |

Таблица 31.64. Спектральный коэффициент диффузного отражения  $\rho_\lambda$  реголита различных районов Луны при температуре от 293 до 300 К [60]

Образцы в виде мелкозернистого порошка; поверхность насыпки сглажена. Материал из района: I — Океана Бурь с глубины 0,16 м; II — Океана Бурь с глубины 0,33 м; III — Моря Спокойствия с глубины 0,10—0,11 м; IV — Моря Изобилия с глубины до 0,08 м; V — Моря Спокойствия с глубины 0,015 м. Погрешность измерений  $\pm 5\%$

| $\lambda$ , мкм | I     | II    | III   | IV    | V     |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,30            | 0,080 | 0,085 | 0,075 | 0,088 | 0,069 |
| 0,50            | 0,110 | 0,112 | 0,095 | 0,100 | 0,080 |
| 0,70            | 0,132 | 0,138 | 0,112 | 0,117 | 0,100 |
| 0,90            | 0,148 | 0,151 | 0,131 | 0,124 | 0,106 |
| 1,2             | 0,145 | 0,145 | 0,117 | 0,124 | 0,102 |
| 1,5             | 0,164 | 0,160 | 0,140 | 0,130 | 0,120 |
| 1,8             | —     | —     | —     | 0,155 | —     |

### 31.13. ЖИДКОСТИ, ОТВЕРЖДЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА

Таблица 31.65. Показатель преломления некоторых жидкостей при температуре от 293 до 298 К

| Жидкость                                    | $\lambda$ , нм | $n$     | Литература |
|---------------------------------------------|----------------|---------|------------|
| Альфамонобромнафталин                       | 589,3          | 1,6588  | [60]       |
| Анилин                                      | 589,3          | 1,586   | [62]       |
| Ацетон                                      | 546,1          | 1,3576  | [63]       |
| »                                           | 632,8          | 1,3542  | [63]       |
| Бензилбензоат                               | 589,3          | 1,568   | [62]       |
| Бензол                                      | 546,1          | 1,5030  | [63]       |
| »                                           | 589,3          | 1,5014  | [64]       |
| »                                           | 632,8          | 1,4950  | [63]       |
| Бромформ                                    | 589,3          | 1,5980  | [64]       |
| Вода дистиллированная +<br>+ глицерин (1:1) | 589,3          | 1,3981  | [65]       |
| n-Гексан                                    | 546,1          | 1,3742  | [63]       |
| »                                           | 632,8          | 1,3711  | [63]       |
| Глицерин                                    | 589,3          | 1,4370  | [64]       |
| Иодометилен                                 | 589,3          | 1,7559  | [64]       |
| Кислота:                                    |                |         |            |
| акриловая                                   | 589,3          | 1,4224  | [30]       |
| валериановая                                | 589,3          | 1,4085  | [66]       |
| винилуксусная                               | 589,3          | 1,4257  | [66]       |
| изовалериановая                             | 589,3          | 1,4085  | [66]       |
| метилуксусная                               | 589,3          | 1,4051  | [66]       |
| серная                                      | 589,3          | 1,4290  | [66]       |
| соляная                                     | 589,3          | 1,2540  | [66]       |
| уксусная                                    | 589,3          | 1,3720  | [66]       |
| Масло:                                      |                |         |            |
| анисовое                                    | 589,3          | 1,560   | [58]       |
| гвоздичное                                  | 589,3          | 1,538   | [27]       |
| касторовое                                  | 589,3          | 1,480   | [56]       |
| кедровое                                    | 589,3          | 1,515   | [58]       |
| коричное                                    | 589,3          | 1,602   | [58]       |
| льняное                                     | 589,3          | 1,485   | [29]       |
| маковое                                     | 589,3          | 1,463   | [29]       |
| оливковое                                   | 589,3          | 1,467   | [58]       |
| парафиновое                                 | 589,3          | 1,440   | [27]       |
| подсолнечное                                | 589,3          | 1,470   | [56]       |
| прованское                                  | 589,3          | 1,460   | [62]       |
| сандаловое                                  | 589,3          | 1,508   | [58]       |
| терпинтиновое                               | 589,3          | 1,470   | [27]       |
| Метилацетат                                 | 589,3          | 1,450   | [61]       |
| Метилен иодистый                            | 589,3          | 1,737   | [61]       |
| Метилсалицилат                              | 589,3          | 1,538   | [61]       |
| Нитробензол                                 | 546,1          | 1,5579  | [57]       |
| »                                           | 589,3          | 1,55257 | [51]       |
| »                                           | 632,8          | 1,5458  | [63]       |
| Паральдегид                                 | 589,3          | 1,405   | [62]       |
| Парафин (жидкий)                            | 589,3          | 1,480   | [62]       |
| Сероуглерод                                 | 546,1          | 1,6347  | [63]       |
| »                                           | 589,3          | 1,620   | [58]       |
| »                                           | 632,8          | 1,6185  | [67]       |
| Скипидар                                    | 589,3          | 1,470   | [56]       |
| Спирт:                                      |                |         |            |
| амиловый                                    | 589,3          | 1,4053  | [66]       |
| изопропиловый                               | 546,1          | 1,3757  | [63]       |
| изопропиловый                               | 632,8          | 1,3726  | [63]       |
| метиловый                                   | 546,1          | 1,3280  | [63]       |
| »                                           | 589,3          | 1,3265  | [56]       |
| »                                           | 632,8          | 1,3253  | [63]       |
| этиловый                                    | 546,1          | 1,3612  | [63]       |
| »                                           | 589,3          | 1,3611  | [66]       |
| »                                           | 632,8          | 1,3583  | [63]       |
| Толуол                                      | 546,1          | 1,4986  | [63]       |
| »                                           | 589,3          | 1,4980  | [56]       |
| »                                           | 632,8          | 1,4901  | [63]       |

Продолжение табл. 31.65

| Жидкость                 | $\lambda$ , нм | $n$    | Литература |
|--------------------------|----------------|--------|------------|
| Углерод четыреххлористый | 546,1          | 1,4613 | [63]       |
| То же                    | 589,3          | 1,4601 | [58]       |
| »                        | 632,8          | 1,4547 | [63]       |
| Хинолин                  | 589,3          | 1,627  | [62]       |
| Хлорбензол               | 589,3          | 1,525  | [62]       |
| Хлороформ                | 546,1          | 1,4477 | [63]       |
| »                        | 589,3          | 1,4455 | [66]       |
| »                        | 632,8          | 1,4435 | [63]       |
| Циклогексан              | 546,1          | 1,4260 | [63]       |
| »                        | 632,8          | 1,4224 | [63]       |
| Эйтенол                  | 589,3          | 1,540  | [58]       |
| Этил коричный            | 589,3          | 1,559  | [62]       |
| Этилсалицилат            | 589,3          | 1,523  | [62]       |
| Эфир диэтиловый          | 589,3          | 1,3526 | [66]       |

Таблица 31.66. Показатель преломления дистиллированной воды при 293 К [67]

| $\lambda$ , нм | $n$    | $\lambda$ , нм | $n$   |
|----------------|--------|----------------|-------|
| 250,0          | 1,3773 | 3000           | 1,446 |
| 308,0          | 1,3569 | 3500           | 1,423 |
| 359,0          | 1,3480 | 3900           | 1,353 |
| 400,0          | 1,3433 | 4600           | 1,380 |
| 434,0          | 1,3403 | 5000           | 1,331 |
| 486,0          | 1,3371 | 6040           | 1,312 |
| 546,1          | 1,3341 | 7000           | 1,330 |
| 589,3          | 1,3330 | 8600           | 1,282 |
| 632,8          | 1,3314 | 10 000         | 1,212 |
| 768,0          | 1,3289 | 11 000         | 1,140 |
| 1000           | 1,3247 | 12 600         | 1,165 |
| 1250           | 1,3210 | 12 600         | 1,280 |
| 2000           | 1,290  | 13 500         | 1,330 |
| 2600           | 1,252  | 14 000         | 1,309 |

Таблица 31.67. Спектральный показатель поглощения чистых природных вод [67]

| $\lambda$ , нм | $a_{\lambda}$ , м <sup>-1</sup> | $\lambda$ , нм | $a_{\lambda}$ , м <sup>-1</sup> |
|----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|
| 390            | 0,038                           | 530            | 0,062                           |
| 410            | 0,037                           | 550            | 0,074                           |
| 430            | 0,036                           | 570            | 0,094                           |
| 450            | 0,037                           | 590            | 0,16                            |
| 470            | 0,039                           | 610            | 0,26                            |
| 490            | 0,042                           | 650            | 0,38                            |
| 510            | 0,054                           | 690            | 0,54                            |

Таблица 31.68. Спектральный показатель поглощения  $a_\lambda$ ,  $\text{м}^{-1}$ , морской воды различных акваторий [67]

Вода океанов взята из районов северных пассатных течений; вода Балтийского моря взята из района Рижского залива. Карибское море:  $a_\lambda$  ( $\lambda = 430 \text{ нм}$ ) =  $0,042 \text{ м}^{-1}$ . Саргассово море:  $a_\lambda$  ( $\lambda = 490 \text{ нм}$ ) =  $0,037 \text{ м}^{-1}$ . Средиземное море:  $a_\lambda$  ( $\lambda = 490 \text{ нм}$ ) =  $0,046 \text{ м}^{-1}$ . Черное море:  $a_\lambda$  ( $\lambda = 490 \text{ нм}$ ) =  $0,069 \text{ м}^{-1}$

| $\lambda$ , нм | Атлантический океан | Тихий океан | Балтийское море |
|----------------|---------------------|-------------|-----------------|
| 390            | 0,032               | 0,12        | 2,7             |
| 410            | 0,034               | 0,15        | 1,9             |
| 430            | 0,021               | 0,15        | 1,2             |
| 450            | 0,018               | 0,13        | 0,90            |
| 470            | 0,014               | 0,087       | 0,83            |
| 490            | 0,012               | 0,064       | 0,62            |
| 510            | 0,018               | 0,060       | 0,44            |
| 530            | 0,030               | 0,060       | 0,39            |
| 550            | 0,034               | 0,067       | 0,30            |
| 570            | 0,055               | 0,085       | 0,25            |
| 590            | 0,14                | 0,17        | 0,28            |
| 610            | 0,24                | 0,26        | 0,37            |
| 650            | 0,33                | 0,36        | 0,41            |
| 690            | 0,52                | 0,56        | 0,62            |

Таблица 31.69. Показатель преломления оптических клеев и смол для  $\lambda = 589,3 \text{ нм}$  при температуре 293 К

| Материал             | $n$    | Материал             | $n$    |
|----------------------|--------|----------------------|--------|
| Клей [68]: акриловый | 1,4861 | УФ-235М жидкий       | 1,456  |
|                      |        | УФ-235М отвержденный | 1,462  |
| бальзам пихтовый     | 1,530  | Смола [54]: даммар   | 1,515  |
| бальзаминный         | 1,5191 | казеин синтетический | 1,550  |
| ОК-50П               | 1,5801 | копал                | 1,540  |
| ОК-60                | 1,5151 | шеллак оранжевый     | 1,516  |
| ОК-72Ф               | 1,586  | янтарь               | 1,539— |
| ОК-90ПЛ              | 1,5411 |                      | 1,545  |

### 31.14. ГАЗЫ И ПЛАЗМА

Таблица 31.70. Показатель преломления воздуха при давлении  $10^5 \text{ Па}$  и температуре 288 К [62]

| $\lambda$ , нм | $n$       | $\lambda$ , нм | $n$       |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| 200            | 1,0003240 | 245            | 1,0003026 |
| 205            | 1,0003205 | 250            | 1,0003012 |
| 210            | 1,0003175 | 255            | 1,0002999 |
| 215            | 1,0003147 | 260            | 1,0002987 |
| 220            | 1,0003121 | 265            | 1,0002976 |
| 225            | 1,0003098 | 270            | 1,0002965 |
| 230            | 1,0003077 | 275            | 1,0002955 |
| 235            | 1,0003058 | 280            | 1,0002946 |
| 240            | 1,0003041 | 285            | 1,0002938 |

Продолжение табл. 31.70

| $\lambda$ , нм | $n$       | $\lambda$ , нм | $n$       |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| 290            | 1,0002930 | 600            | 1,0002769 |
| 295            | 1,0002922 | 650            | 1,0002763 |
| 300            | 1,0002915 | 700            | 1,0002757 |
| 310            | 1,0002901 | 750            | 1,0002753 |
| 320            | 1,0002889 | 800            | 1,0002750 |
| 330            | 1,0002878 | 850            | 1,0002747 |
| 340            | 1,0002868 | 900            | 1,0002745 |
| 350            | 1,0002860 | 950            | 1,0002743 |
| 360            | 1,0002852 | 1000           | 1,0002741 |
| 370            | 1,0002845 | 1200           | 1,0002737 |
| 380            | 1,0002839 | 1400           | 1,0002734 |
| 390            | 1,0002833 | 1600           | 1,0002732 |
| 400            | 1,0002827 | 1800           | 1,0002731 |
| 420            | 1,0002817 | 2000           | 1,0002730 |
| 440            | 1,0002809 | 2500           | 1,0002729 |
| 460            | 1,0002802 | 3000           | 1,0002728 |
| 480            | 1,0002795 | 5000           | 1,0002727 |
| 500            | 1,0002789 | 7000           | 1,0002726 |
| 520            | 1,0002784 | 10 000         | 1,0002726 |
| 540            | 1,0002780 | 20 000—        | 1,0002726 |
| 560            | 1,0002776 | 50 000         |           |
| 580            | 1,0002772 |                |           |

Таблица 31.71. Коэффициент теплового излучения воздуха при различных температуре и давлении [69]

Радиус полусферического слоя воздуха 0,1 м.  
Погрешность измерений  $\pm 15\%$

| $T$ , К | $\epsilon_T$ при давлении, Па |                      |                      |                      |
|---------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|         | $10^4$                        | $10^5$               | $10^6$               | $5 \cdot 10^6$       |
| 2000    | $2,89 \cdot 10^{-5}$          | $2,91 \cdot 10^{-4}$ | $2,88 \cdot 10^{-3}$ | $1,41 \cdot 10^{-2}$ |
| 3000    | $1,58 \cdot 10^{-5}$          | $2,12 \cdot 10^{-4}$ | $2,74 \cdot 10^{-3}$ | $1,66 \cdot 10^{-2}$ |
| 4000    | $9,42 \cdot 10^{-6}$          | $2,73 \cdot 10^{-4}$ | $4,30 \cdot 10^{-3}$ | $2,61 \cdot 10^{-2}$ |
| 5000    | $1,86 \cdot 10^{-5}$          | $5,93 \cdot 10^{-4}$ | $1,07 \cdot 10^{-2}$ | $5,04 \cdot 10^{-2}$ |
| 6000    | $3,02 \cdot 10^{-5}$          | $1,02 \cdot 10^{-3}$ | $2,38 \cdot 10^{-2}$ | $1,33 \cdot 10^{-1}$ |
| 7000    | $4,06 \cdot 10^{-5}$          | $1,18 \cdot 10^{-3}$ | $3,51 \cdot 10^{-2}$ | $1,99 \cdot 10^{-1}$ |
| 8000    | $1,10 \cdot 10^{-4}$          | $1,46 \cdot 10^{-3}$ | $4,00 \cdot 10^{-2}$ | $2,88 \cdot 10^{-1}$ |
| 9000    | $4,14 \cdot 10^{-4}$          | $3,16 \cdot 10^{-3}$ | $5,22 \cdot 10^{-2}$ | $3,52 \cdot 10^{-1}$ |
| 10 000  | $1,19 \cdot 10^{-3}$          | $7,29 \cdot 10^{-3}$ | $6,89 \cdot 10^{-2}$ | $4,05 \cdot 10^{-1}$ |
| 11 000  | $2,64 \cdot 10^{-3}$          | $1,39 \cdot 10^{-2}$ | $9,53 \cdot 10^{-2}$ | $4,68 \cdot 10^{-1}$ |
| 12 000  | $4,39 \cdot 10^{-3}$          | $2,63 \cdot 10^{-2}$ | $1,40 \cdot 10^{-1}$ | $5,09 \cdot 10^{-1}$ |
| 13 000  | $5,51 \cdot 10^{-3}$          | $4,02 \cdot 10^{-2}$ | $1,63 \cdot 10^{-1}$ | $4,75 \cdot 10^{-1}$ |
| 14 000  | $5,42 \cdot 10^{-3}$          | $5,25 \cdot 10^{-2}$ | $2,18 \cdot 10^{-1}$ | $6,58 \cdot 10^{-1}$ |
| 15 000  | $4,52 \cdot 10^{-3}$          | $6,17 \cdot 10^{-2}$ | $2,64 \cdot 10^{-1}$ | $7,34 \cdot 10^{-1}$ |
| 16 000  | $3,58 \cdot 10^{-3}$          | $6,82 \cdot 10^{-2}$ | $3,14 \cdot 10^{-1}$ | $8,54 \cdot 10^{-1}$ |
| 17 000  | $2,76 \cdot 10^{-3}$          | $7,04 \cdot 10^{-2}$ | $3,49 \cdot 10^{-1}$ | $8,23 \cdot 10^{-1}$ |
| 18 000  | $2,24 \cdot 10^{-3}$          | $6,85 \cdot 10^{-2}$ | $3,62 \cdot 10^{-1}$ | $8,56 \cdot 10^{-1}$ |
| 19 000  | $1,79 \cdot 10^{-3}$          | $6,27 \cdot 10^{-2}$ | $3,65 \cdot 10^{-1}$ | $8,27 \cdot 10^{-1}$ |
| 20 000  | $1,53 \cdot 10^{-3}$          | $5,37 \cdot 10^{-2}$ | $3,65 \cdot 10^{-1}$ | $8,63 \cdot 10^{-1}$ |

Таблица 31.72. Коэффициент теплового излучения углекислого газа при различных температуре и давлении [69]

Радиус полусферического слоя газа 0,1 м

| Т, К | $\epsilon_T$ при давлении, Па |                     |                     |
|------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
|      | $10^3$                        | $10^4$              | $10^5$              |
| 2000 | $4,5 \cdot 10^{-3}$           | $3,6 \cdot 10^{-2}$ | $8,8 \cdot 10^{-2}$ |
| 3000 | $1,2 \cdot 10^{-4}$           | $3,0 \cdot 10^{-3}$ | $3,2 \cdot 10^{-2}$ |
| 4000 | $2,2 \cdot 10^{-4}$           | $2,1 \cdot 10^{-4}$ | $3,0 \cdot 10^{-3}$ |
| 5000 | $2,6 \cdot 10^{-5}$           | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ |
| 6000 | $6,1 \cdot 10^{-5}$           | $8,3 \cdot 10^{-4}$ | $3,1 \cdot 10^{-3}$ |

Таблица 31.73. Показатели преломления некоторых газов при нормальных условиях [62]

Погрешность измерений  $\pm (5 - 7) \cdot 10^{-8}$

| Газ                                     | $\lambda$ , нм | $n$       |
|-----------------------------------------|----------------|-----------|
| Азот [63]                               | 546,1          | 1,0002793 |
| »                                       | 632,8          | 1,0002781 |
| Аммиак                                  | 589,3          | 1,000375  |
| Аргон [63]                              | 546,1          | 1,0002630 |
| »                                       | 632,8          | 1,0002618 |
| Ацетилен                                | 589,3          | 1,000606  |
| Бром                                    | 589,3          | 1,001125  |
| Бромистый водород                       | 589,3          | 1,000570  |
| Водород                                 | 589,3          | 1,000139  |
| Водяной пар [63]                        | 546,1          | 1,0002354 |
| »                                       | 632,8          | 1,0002337 |
| Гелий [70]                              | 447,3          | 1,0002753 |
| »                                       | 471,5          | 1,0002745 |
| »                                       | 492,3          | 1,0002738 |
| »                                       | 501,7          | 1,0002736 |
| »                                       | 587,7          | 1,0002719 |
| Дейтерий                                | 589,3          | 1,000137  |
| Закись азота                            | 589,3          | 1,000515  |
| Иодистый водород                        | 589,3          | 1,000906  |
| Кислород [63]                           | 546,1          | 1,0002531 |
| »                                       | 632,8          | 1,0002516 |
| Криптон (естественный) [70]             | 450,4          | 1,0002752 |
| »                                       | 556,4          | 1,0002724 |
| »                                       | 565,1          | 1,0002722 |
| »                                       | 587,3          | 1,0002719 |
| »                                       | 605,8          | 1,0002716 |
| »                                       | 645,8          | 1,0002711 |
| Криптон (изотоп $^{86}\text{Kr}$ ) [71] | 556,4          | 1,0002724 |
| »                                       | 587,3          | 1,0002717 |
| »                                       | 608,5          | 1,0002716 |
| »                                       | 760,4          | 1,0002700 |
| »                                       | 851,1          | 1,0002695 |
| »                                       | 877,9          | 1,0002694 |
| »                                       | 893,1          | 1,0002693 |
| »                                       | 975,4          | 1,0002690 |
| Ксенон                                  | 589,3          | 1,000702  |
| Метан                                   | 589,3          | 1,000441  |
| Неон [72]                               | 585,4          | 1,0002719 |
| »                                       | 607,4          | 1,0002716 |
| »                                       | 614,5          | 1,0002715 |
| »                                       | 640,4          | 1,0002711 |
| Озон [63]                               | 589,3          | 1,000511  |
| Оксид азота                             | 589,3          | 1,000297  |
| Оксид углерода [73]                     | 589,3          | 1,000334  |

Продолжение табл. 31.73

| Газ                     | $\lambda$ , нм | $n$       |
|-------------------------|----------------|-----------|
| Сернистый газ           | 589,3          | 1,000660  |
| Серный ангидрид         | 589,3          | 1,000737  |
| Сероводород             | 589,3          | 1,000619  |
| Углекислый газ [63]     | 546,1          | 1,0004197 |
| »                       | 632,8          | 1,0004174 |
| Фтор                    | 589,3          | 1,000195  |
| Фтористый метил         | 589,3          | 1,000449  |
| Хлор                    | 589,3          | 1,000768  |
| Хлористый водород       | 589,3          | 1,000444  |
| Хлористый метил         | 589,3          | 1,000865  |
| Четыреххлористый теллур | 589,3          | 1,002600  |
| Шестифтористая сера     | 589,3          | 1,000783  |

Таблица 31.74. Показатель преломления некоторых газов при температуре ожигения [74]

| Вещество | Т, К | $\lambda$ , мкм | $n$    |
|----------|------|-----------------|--------|
| Азот     | 78,0 | 0,589           | 1,205  |
| Водород  | 20,4 | 0,589           | 1,0974 |
| Гелий:   |      |                 |        |
| He I     | 4,2  | 0,546           | 1,0206 |
| He II    | 2,18 | 0,546           | 1,0269 |
| Кислород | 92,0 | 0,589           | 1,221  |

Таблица 31.75. Спектральный коэффициент поглощения кислорода в ультрафиолетовой области спектра [69]

Температура 3000 К, толщина слоя  $5 \cdot 10^{-2}$  м

| $\lambda$ , мкм | $\alpha_\lambda$ | $\lambda$ , мкм | $\alpha_\lambda$ |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0,220           | 0,35             | 0,250           | 0,14             |
| 0,225           | 0,29             | 0,255           | 0,10             |
| 0,230           | 0,26             | 0,260           | 0,09             |
| 0,235           | 0,22             | 0,265           | 0,07             |
| 0,240           | 0,19             | 0,270           | 0,04             |
| 0,245           | 0,15             | 0,275           | 0,02             |

Таблица 31.76. Коэффициент теплового излучения водородной плазмы [69]

Радиус полусферического слоя плазмы 0,5 м.  
Погрешность измерений  $\pm 20\%$

| Т, К   | $\epsilon_T$ при давлении, $10^6$ Па |      |      |      |      |      |      |
|--------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|        | 20                                   | 15   | 10   | 7    | 4    | 2    | 1    |
| 9000   | 0,46                                 | 0,37 | 0,27 | 0,20 | 0,11 | 0,05 | 0,03 |
| 10 000 | 0,73                                 | 0,65 | 0,51 | 0,40 | 0,26 | 0,15 | 0,09 |
| 11 000 | —                                    | 0,85 | 0,75 | 0,66 | 0,50 | 0,31 | 0,20 |
| 12 000 | —                                    | —    | 0,92 | 0,85 | 0,70 | 0,51 | 0,38 |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бришамбо Ш. П. Солнечное излучение и радиационный обмен в атмосфере. М.: Мир, 1969.
2. Новицкий Л. А. // Теплофизика высоких температур. 1967. Т. 5, № 5. С. 919—923
3. Новицкий Л. А. // Теплофизика высоких температур. 1968. Т. 6, № 3. С. 529—536.
4. Новицкий Л. А., Вдовин В. Г., Федотов Г. И. // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1974. Вып. 6. С. 97—101.
5. Новицкий Л. А., Трущицына А. В. // Измерительная техника. 1970, № 7. С. 46—47.
6. Новицкий Л. А., Трущицына А. В., Варакина Л. П. // Приборы и системы управления. 1969, № 6. С. 30—32.
7. Жевандров Н. Д. Поляризация света. М.: Наука, 1969.
8. Шерклифф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.
9. Оптико-электронные приборы для научных исследований / Под ред. Л. А. Новицкого. М.: Машиностроение, 1986.
10. Гуревич В. З. Электрические инфракрасные излучатели. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963
11. Гуревич М. М. Введение в фотометрию. Л.: Энергия, 1968.
12. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Фотометрия быстротекущих процессов: Справочник. М.: Машиностроение, 1983.
13. Лабораторные оптические приборы / Под ред. Л. А. Новицкого. М.: Машиностроение, 1979.
14. Измерение температур в объектах новой техники / Под ред. А. Н. Гордова. М.: Мир, 1965.
15. Кинджери В. А. Измерения при высоких температурах. М.: Металлургиздат, 1963.
16. Кизель В. А. Отражение света. М.: Наука, 1973.
17. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. М.: Физматгиз, 1961.
18. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.
19. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978.
20. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.
21. Оптические материалы для инфракрасной техники / Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. М.: Наука, 1965.
22. Справочник по электротехническим материалам. Т. II / Под ред. Н. П. Богородицкого и В. В. Пасынкова. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.
23. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
24. Goldsmith A., Waterman T. E., Hirschhorn H. I. Handbook of thermophysical properties of solid materials. Vol. I—IV. Oxford—London: Pergamon Press, 1963.
25. Оптическое стекло. Каталог СССР—ГДР. М.: Машприборинторг, 1979.
26. Лагутин В. И., Лиханов В. П., Никонова Е. И. // Оптико-механическая промышленность. 1984. № 5. С. 53—58.
27. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятин. М.: Машиностроение, 1982.
28. Ландсберг Г. М. Оптика. М.: Наука, 1976.
29. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980.
30. Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. Прикладная оптика и оптические измерения. М.: Машиностроение, 1968.
31. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
32. Байборodin Ю. В., Гаража С. А. Электрооптический эффект в кристаллах и его применение в приборостроении. М.: Машиностроение, 1967.
33. Круз П., Макглоулин Л., Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. М.: Воениздат, 1964.
34. Гарбуни М. Физика оптических явлений. М.: Энергия, 1967.
35. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972.
36. Хэкфорд Г. Л. Инфракрасное излучение. М.—Л.: Энергия, 1964.
37. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. М.: Машиностроение, 1970.
38. Климов Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. М.: Советское радио, 1978.
39. Смоля А. В., Тюрина С. Л. Оптическая керамика на основе окиси иттрия // Оптико-физические измерения. М.: Издательство стандартов, 1977. С. 163—167.
40. Рабинович Г. Д., Слободкин Л. С. Терморadiационная и конвективная сушка лакокрасочных покрытий // Наука и техника, 1966.
41. Дракин И. И. Аэродинамический и лучистый нагрев в полете. М.: Оборонгиз, 1961.
42. Новицкий Л. А. // Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4, № 4. С. 621—631.
43. Новицкий Л. А. // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7, № 5. С. 997—1007
44. Крошкин М. Г. Физико-технические основы космических исследований. М.: Машиностроение, 1969.
45. Леконт Ж. Инфракрасное излучение. М.: Физматгиз, 1958.
46. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М.: Наука, 1964.
47. Гуторов М. М. Основы светотехники и источники света. М.: Энергоатомиздат, 1983.
48. Philip R./J. phys. et radium. 1959. Vol. 20, № 5. P. 535—540.
49. Графит как высокотемпературный материал / Под ред. К. П. Власова. М.: Мир, 1964.
50. Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ / Под ред. И. Т. Аладьева. М.: Наука, 1968
51. Петров В. А. Излучательная способность высокотемпературных материалов. М.: Наука, 1969.
52. Власов Л. В., Либман А. А., Самойлов Л. Н. Измерение коэффициентов излучения высокотемпературных материалов // Проблемы энергетической фотометрии. М.: Атомиздат, 1979.
53. Мельников Ю. Ф. Светотехнические материалы. М.: Высшая школа, 1976.
54. Смит Г. Драгоценные камни. М.: Мир, 1980.
55. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962.
56. Гаррисон Т. Р. Радиационная пирометрия. М.: Мир, 1964.
57. Корнилов Н. И., Солодова Ю. П. Ювелирные камни. М.: Недра, 1983.
58. Биркбэк Р. К. // Тр. Американского о-ва инженеров-механиков. Сер. С. Теплопередача. 1972. Т. 94, № 3. С. 72—73. / Пер. с англ. М.: Мир, 1973.
59. Биркбэк Р. К. // Приборы для научных исследований. 1972. № 7. С. 65—68.
60. Лунный грунт из Моря Изобилия / Под ред. А. П. Виноградова. М.: Наука, 1975.
61. Бегунов Б. Н., Заказов Н. П. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973.
62. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
63. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973.
64. Кривовяз Л. М., Пураев Д. Т., Знаменская М. А.



Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974.

65. Воронков Г. Л. Ослабители оптического излучения. Л.: Машиностроение, 1980.

66. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. М.: Химия, 1977.

67. Иванов А. П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975.

68. Технология оптических деталей/Под ред. М. Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1978.

69. Радиационные свойства газов при высоких температурах/В. А. Каменщиков, Ю. А. Пластилин, В. М. Николаев, Л. А. Новицкий. М.: Машиностроение, 1971.

70. Martin W. C.//JOSA. 1960. Vol. 50, № 2. P. 174—177.

71. Littlefield T. A.//Nature. 1950. Vol. 165. P. 187—189.

72. Burns J., Adams G., Longwell F.//JOSA. 1950. Vol. 40, № 5. P. 340—346.

73. Енохович А. С. Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1968.

74. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — 3-е изд./Под ред. М. П. Малкова. М.—Л.: Энергоатомиздат, 1985.

## Глава 32

# СПЕКТРЫ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

А. А. Радциг

### 32.1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенные процессы излучения и поглощения света в среде атомных и молекулярных частиц обусловлены переходами между их электронными состояниями и могут быть подразделены на три типа: 1) свободно-свободные переходы (тормозное излучение и поглощение света при рассеянии электронов на атомах и ионах, сплошной спектр); 2) связанно-свободные переходы (фотоионизация атомов и молекул и фоторекомбинация электронов на ионах и нейтральных частицах, сплошной спектр) и 3) связанно-связанные (дискретные) переходы (линейчатый спектр атомов и полосатый спектр молекул).

Мы подробно остановимся только на дискретных спектрах атомов и молекул в оптическом диапазоне длин волн, которые возникают при переходах электронов в пределах внешней (валентной) оболочки, а так-

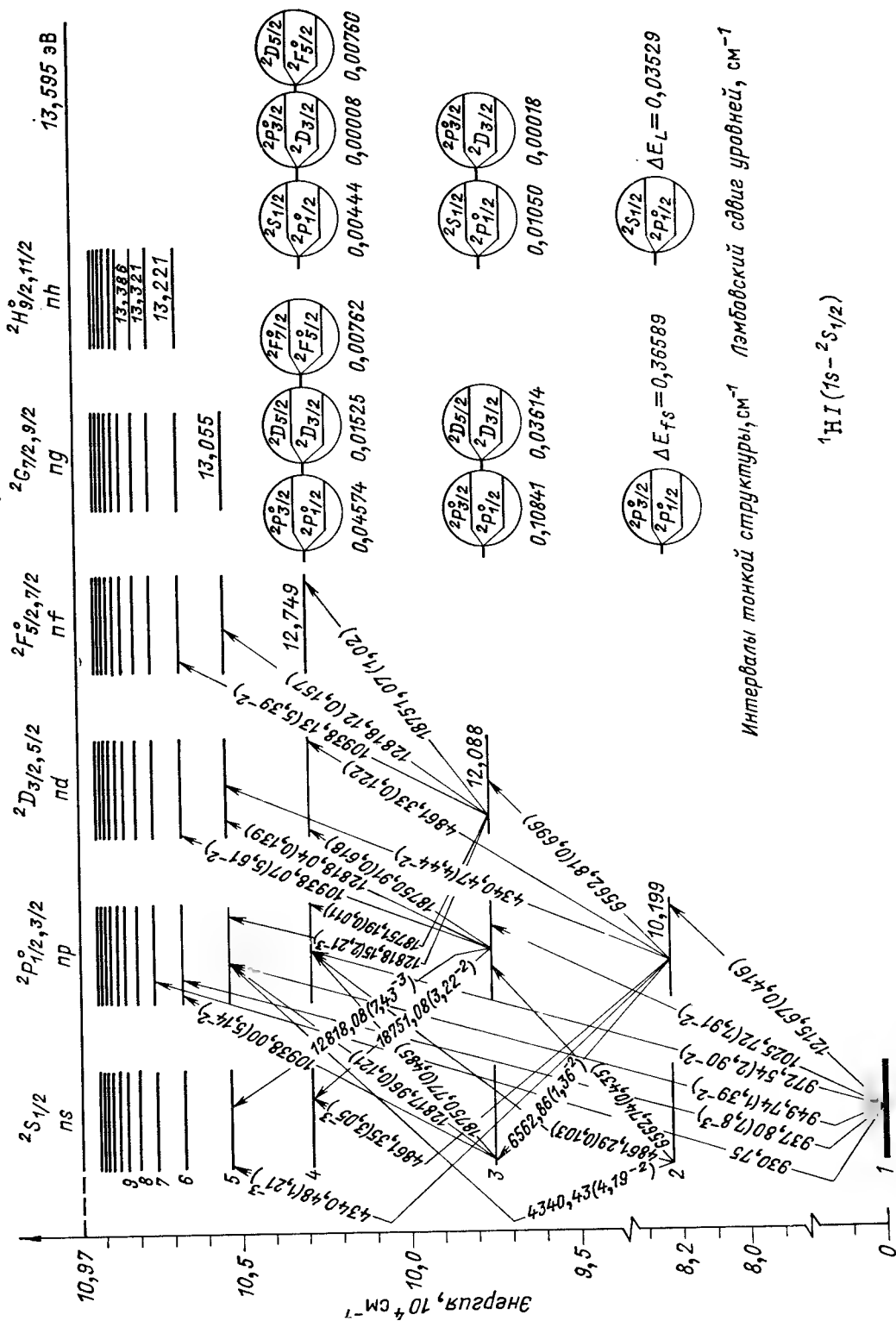
же связаны с изменениями колебательно-вращательных состояний молекулярных частиц. Соответственно будет представлена информация о возбужденных состояниях атомных частиц и параметрах тонкой, сверхтонкой и изотопической структуры в их спектрах. В случае молекулярных частиц будут рассмотрены спектроскопические постоянные и электронные термы наиболее распространенных двухатомных молекул.

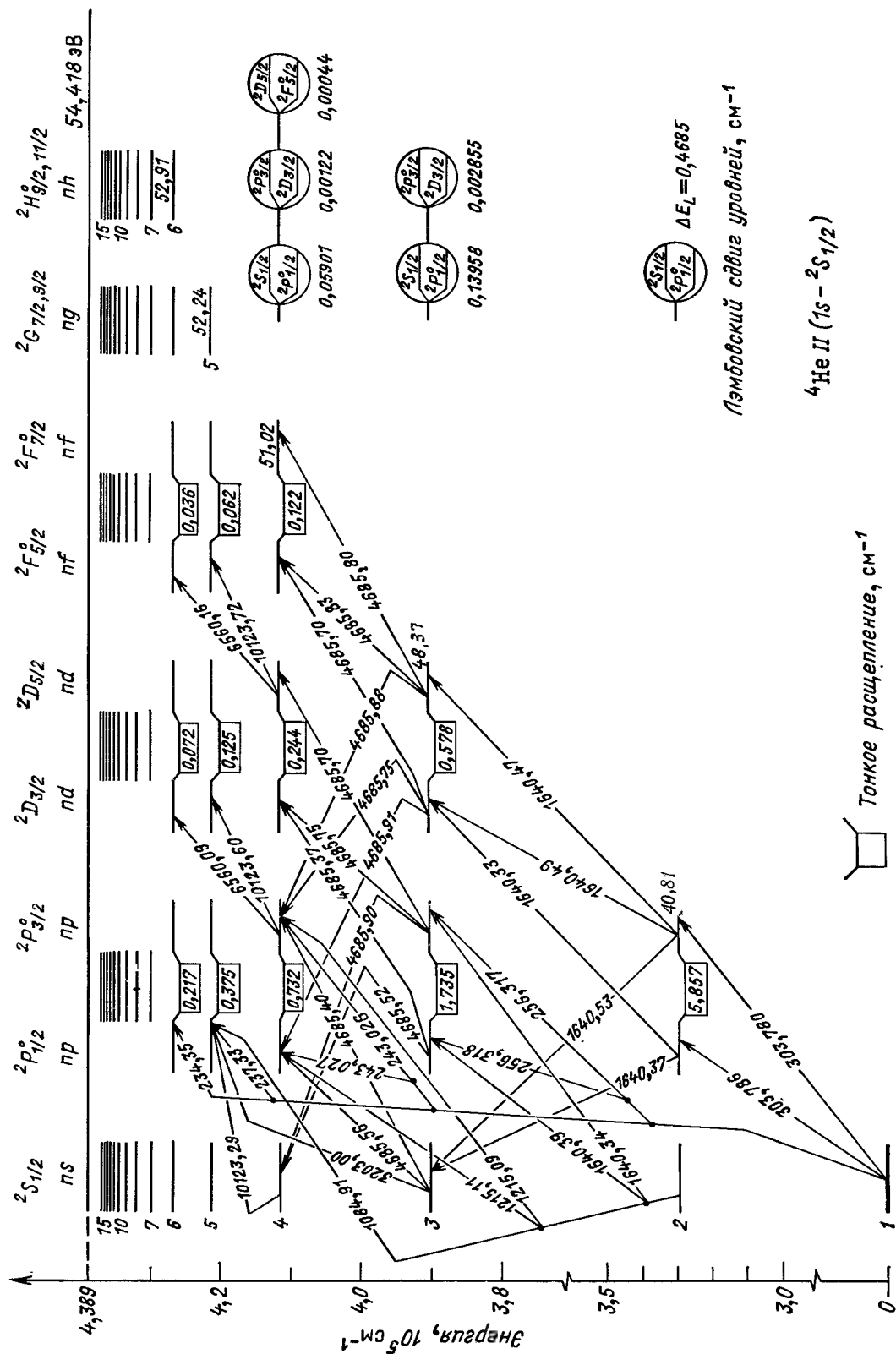
### 32.2. ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ

Линейчатый спектр нейтральных атомов в оптическом диапазоне (инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом, см. табл. 32.1) обусловлен, как правило, переходами внешнего валентного электрона. На рис. 32.1—32.43 представлены комбинированные диаграммы уровней энергии и спектров (называемые так-

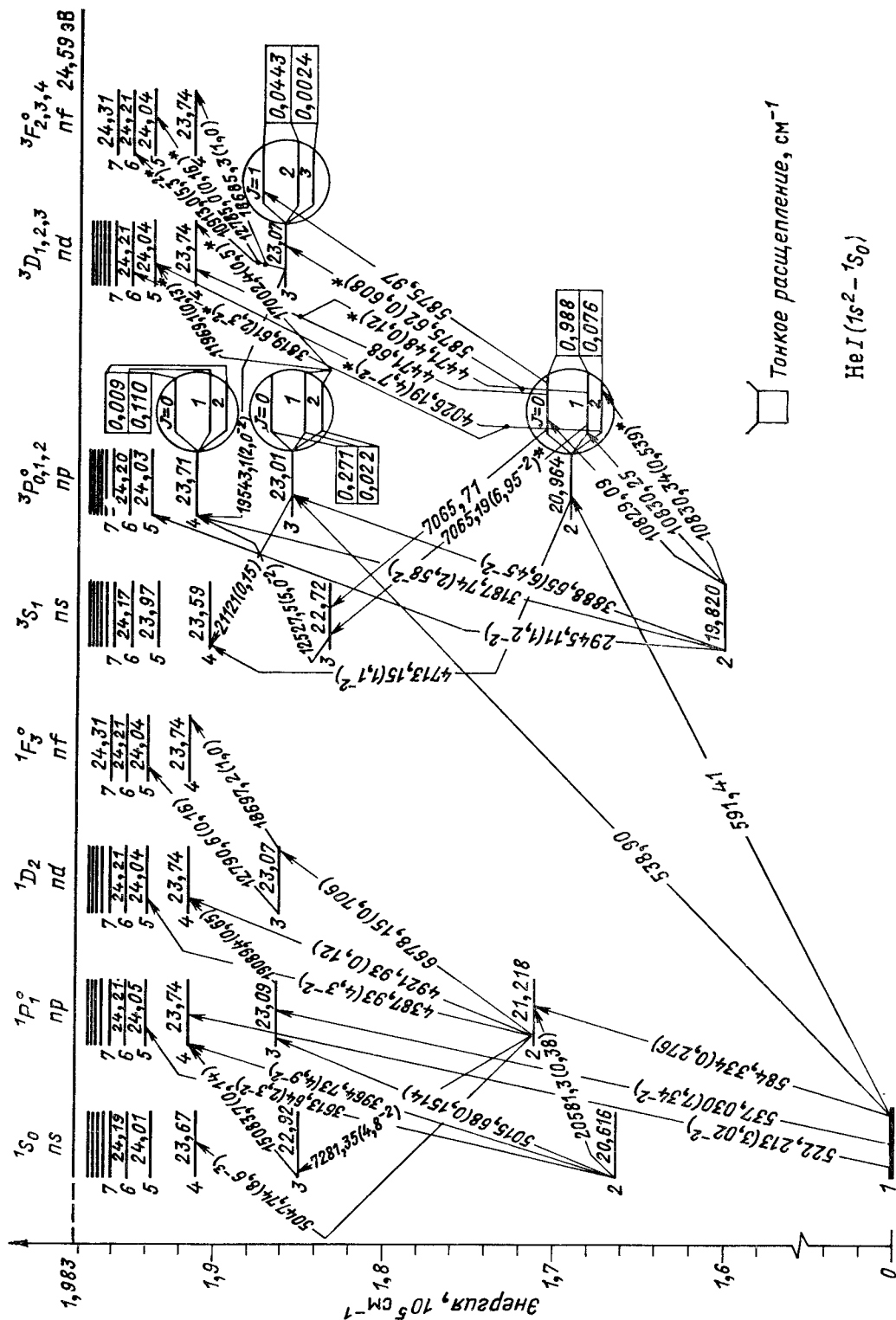
Таблица 32.1. Сложившиеся «именные» диапазоны длин волн электромагнитного излучения

| Тип волны                   | Диапазон длин волн,<br>10 <sup>-10</sup> м | Диапазон энергий квантов<br>излучения, эВ    | Диапазон характерных<br>температур T, К источника<br>теплового излучения:<br>$h\nu = 2,82 kT$ |
|-----------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Радиоволны:                 |                                            |                                              |                                                                                               |
| сверхдлинные                | 10 <sup>14</sup> —10 <sup>18</sup>         | 1,2·10 <sup>-10</sup> —1,2·10 <sup>-14</sup> | 5,1·10 <sup>-7</sup> —5,1·10 <sup>-11</sup>                                                   |
| длинные                     | 10 <sup>13</sup> —10 <sup>14</sup>         | 1,2·10 <sup>-9</sup> —1,2·10 <sup>-10</sup>  | 5,1·10 <sup>-6</sup> —5,1·10 <sup>-7</sup>                                                    |
| средние                     | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>13</sup>         | 1,2·10 <sup>-8</sup> —1,2·10 <sup>-9</sup>   | 5,1·10 <sup>-5</sup> —5,1·10 <sup>-6</sup>                                                    |
| короткие                    | 10 <sup>11</sup> —10 <sup>12</sup>         | 1,2·10 <sup>-7</sup> —1,2·10 <sup>-8</sup>   | 5,1·10 <sup>-4</sup> —5,1·10 <sup>-5</sup>                                                    |
| ультракороткие (УКВ)        | 10 <sup>8</sup> —10 <sup>11</sup>          | 0,0124—1,2·10 <sup>-7</sup>                  | 51—5,1·10 <sup>-4</sup>                                                                       |
| Инфракрасное излучение:     |                                            |                                              |                                                                                               |
| далекое                     | 10 <sup>5</sup> —10 <sup>7</sup>           | 0,124—1,24·10 <sup>-3</sup>                  | 510—5                                                                                         |
| близкое                     | 7500—10 <sup>5</sup>                       | 1,65—0,124                                   | 6803—510                                                                                      |
| Видимый свет:               |                                            |                                              |                                                                                               |
| красный                     | 6500—7500                                  | 1,91—1,65                                    | 7849—6803                                                                                     |
| оранжевый                   | 5900—6500                                  | 2,10—1,91                                    | 8647—7849                                                                                     |
| желтый                      | 5300—5900                                  | 2,34—2,10                                    | 9626—8647                                                                                     |
| зеленый                     | 4900—5300                                  | 2,53—2,34                                    | 10412—9626                                                                                    |
| синий                       | 4200—4900                                  | 2,95—2,53                                    | 12148—10412                                                                                   |
| фиолетовый                  | 4000—4200                                  | 3,10—2,95                                    | 12755—12148                                                                                   |
| Ультрафиолетовое излучение: |                                            |                                              |                                                                                               |
| ближнее                     | 2000—4000                                  | 6,20—3,10                                    | 25510—12755                                                                                   |
| дальнее (вакуумное)         | 100—2000                                   | 124—6,20                                     | 5,1·10 <sup>5</sup> —25510                                                                    |
| Рентгеновское излучение:    |                                            |                                              |                                                                                               |
| мягкое                      | 1—20                                       | 1,24·10 <sup>4</sup> —620                    | 5,1·10 <sup>7</sup> —2,6·10 <sup>6</sup>                                                      |
| жесткое                     | 0,06—1                                     | 2,07·10 <sup>5</sup> —1,24·10 <sup>4</sup>   | 8,5·10 <sup>8</sup> —5,1·10 <sup>7</sup>                                                      |
| Гамма-излучение             | 5·10 <sup>-4</sup> —2                      | 2,48·10 <sup>7</sup> —6,2·10 <sup>3</sup>    | 1,0·10 <sup>11</sup> —2,5·10 <sup>7</sup>                                                     |





**Рис. 32.2. Днаграмма Гротриана для иона гелия**



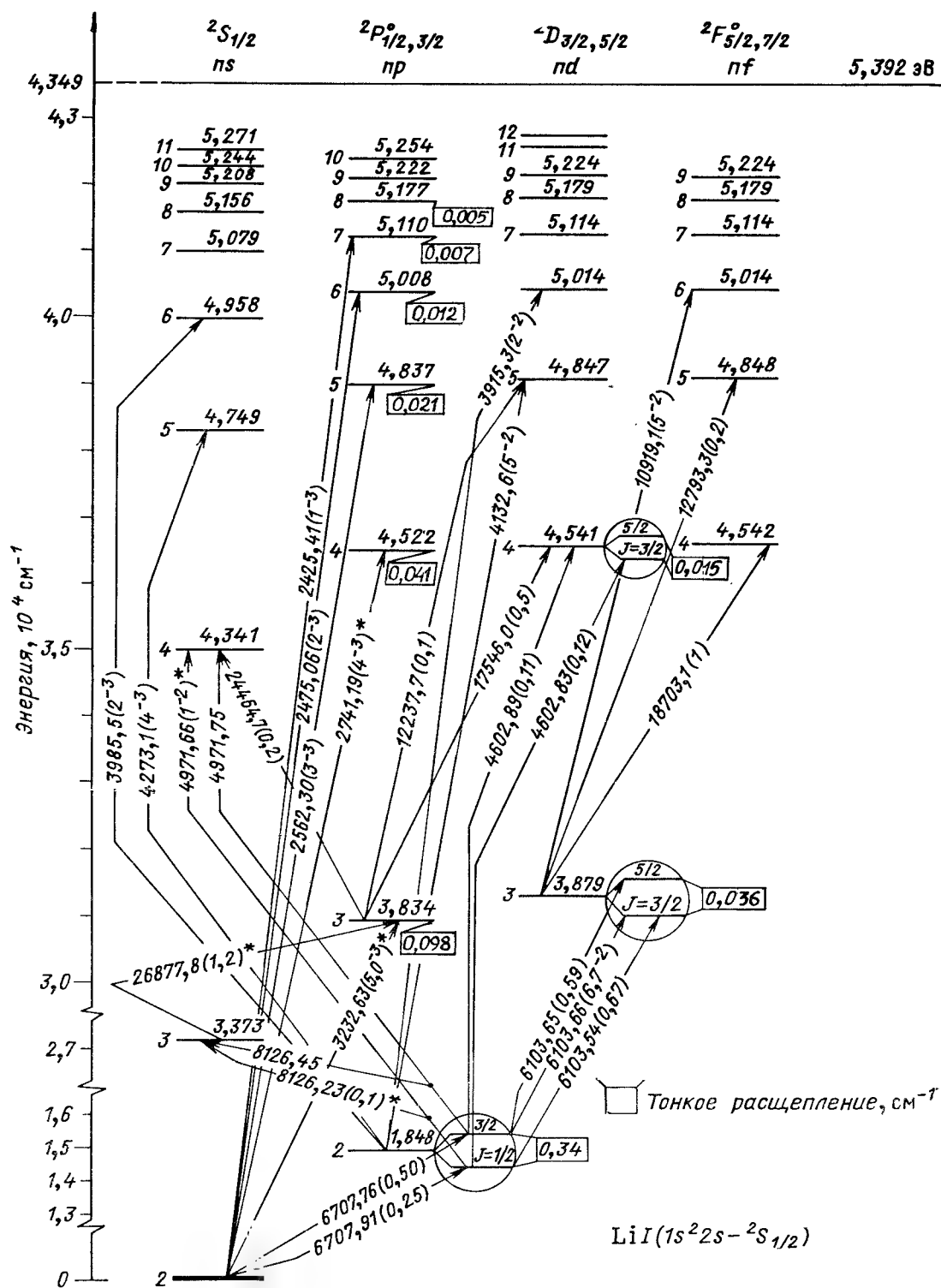


Рис. 32.4. Диаграмма Гротриана для атома лития

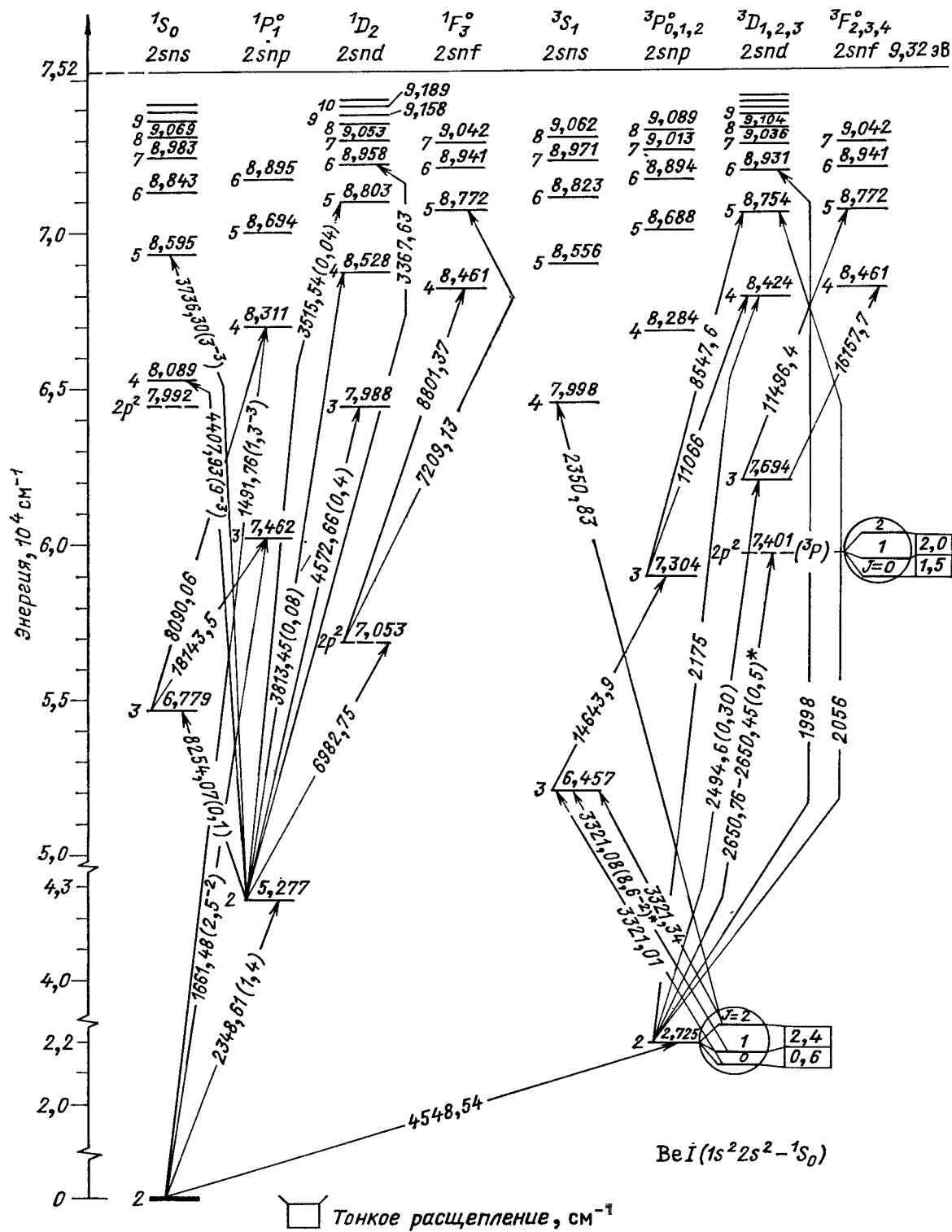


Рис. 32.5. Диаграмма Гроттриана для атома бериллия

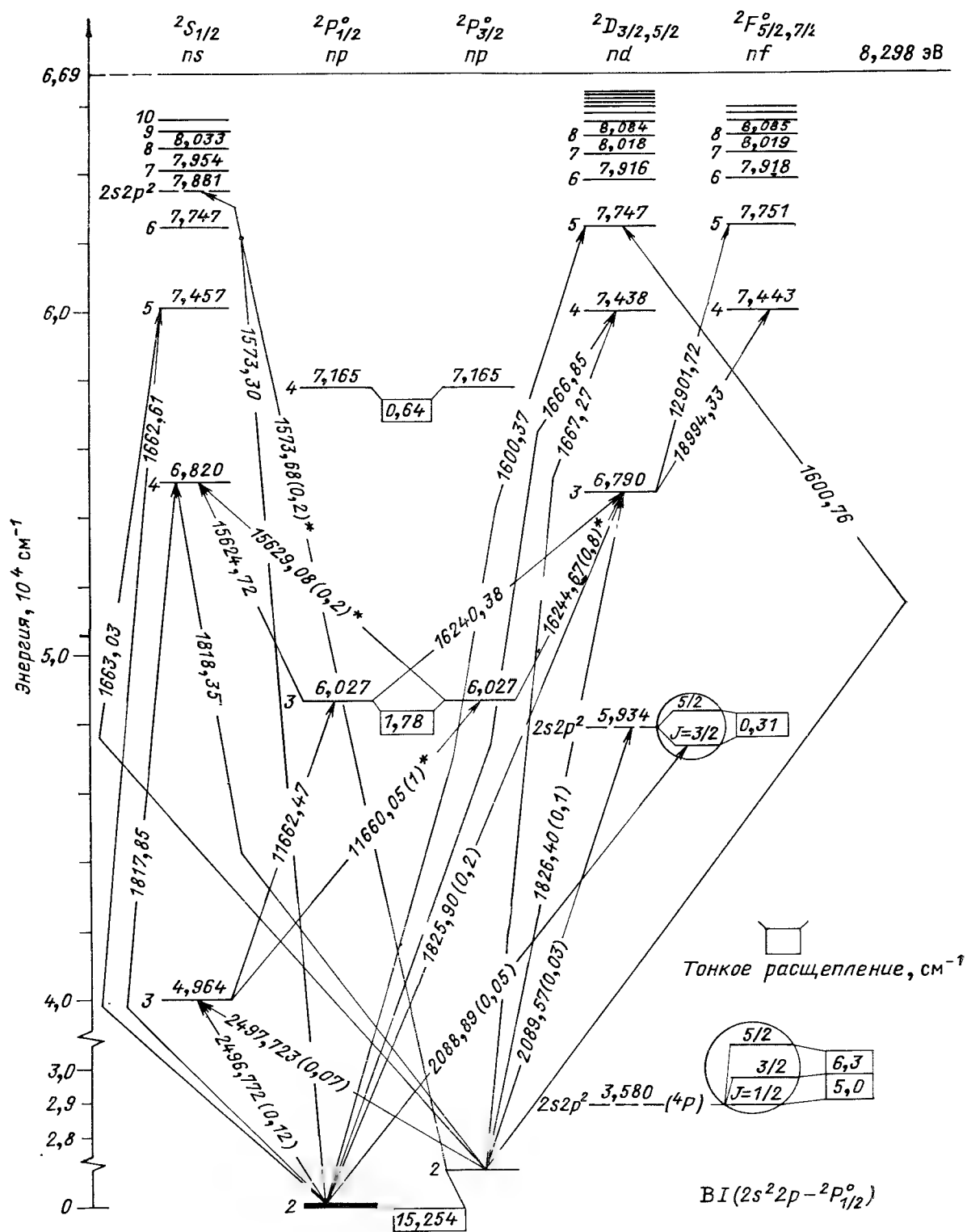


Рис. 32.6. Диаграмма Гроттриана для атома бора

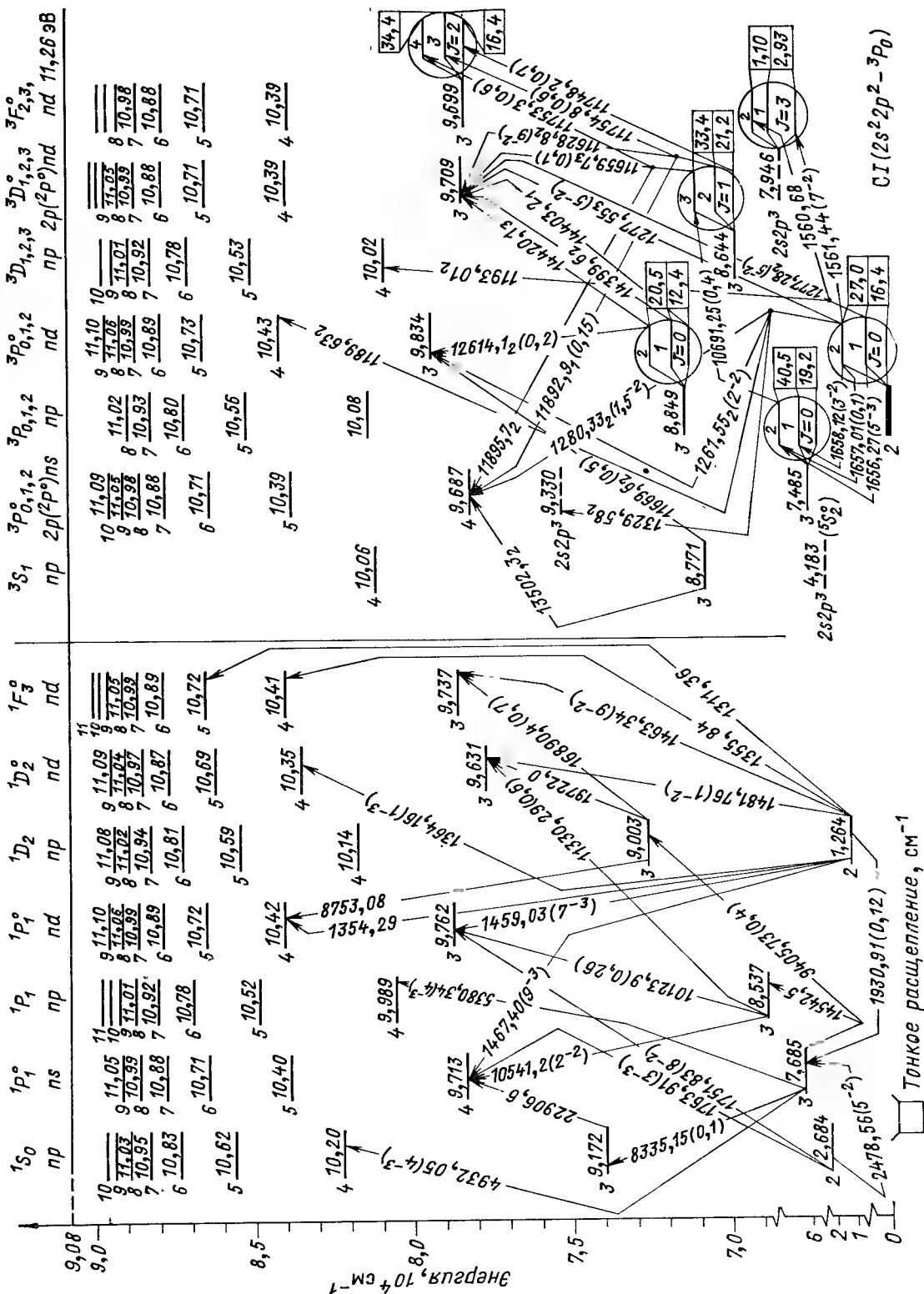


Рис. 32.7. Диаграмма Гротриана для атома углерода



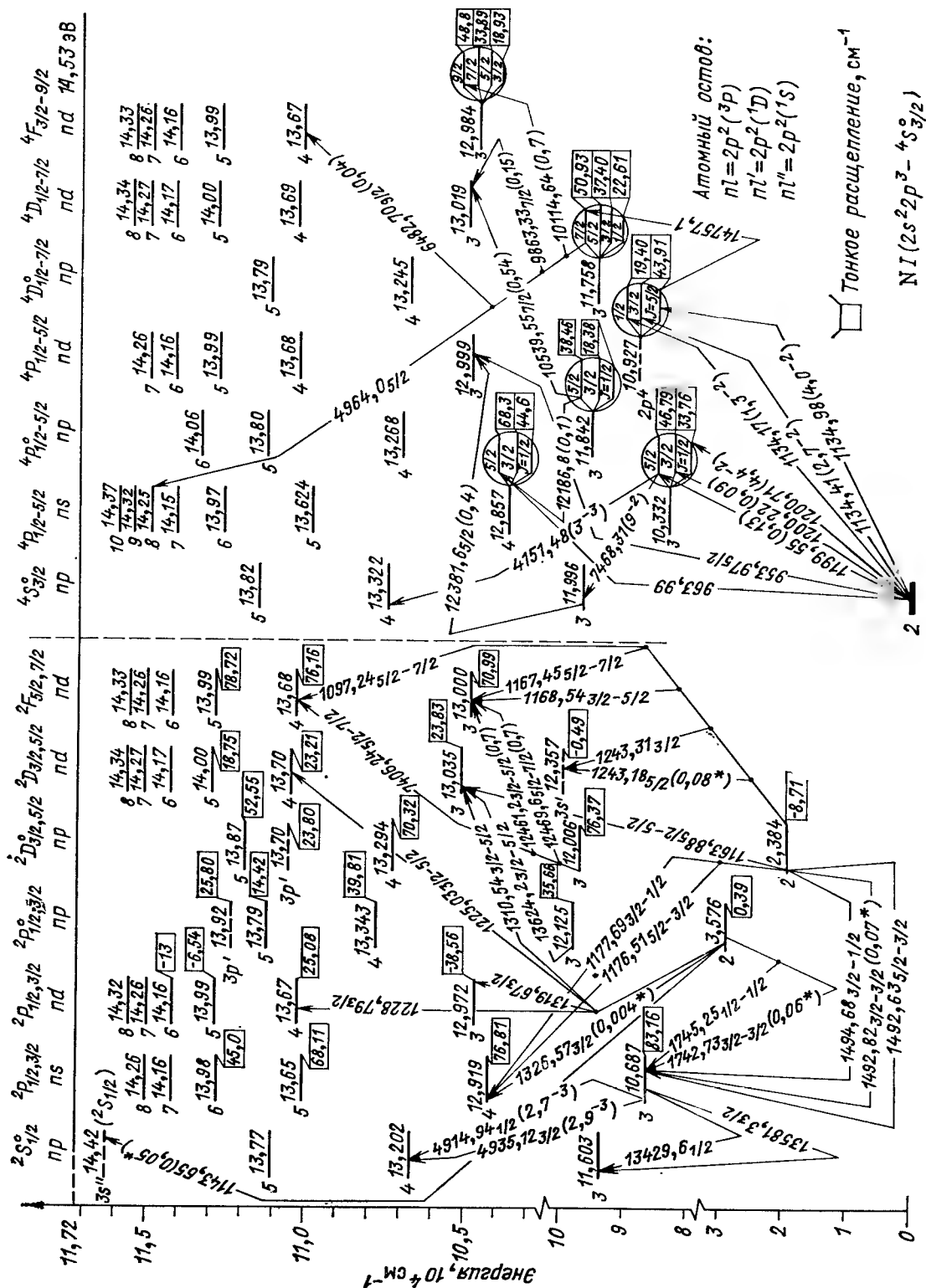


Рис. 32.8. Диаграмма Гроттрмана для атома азота

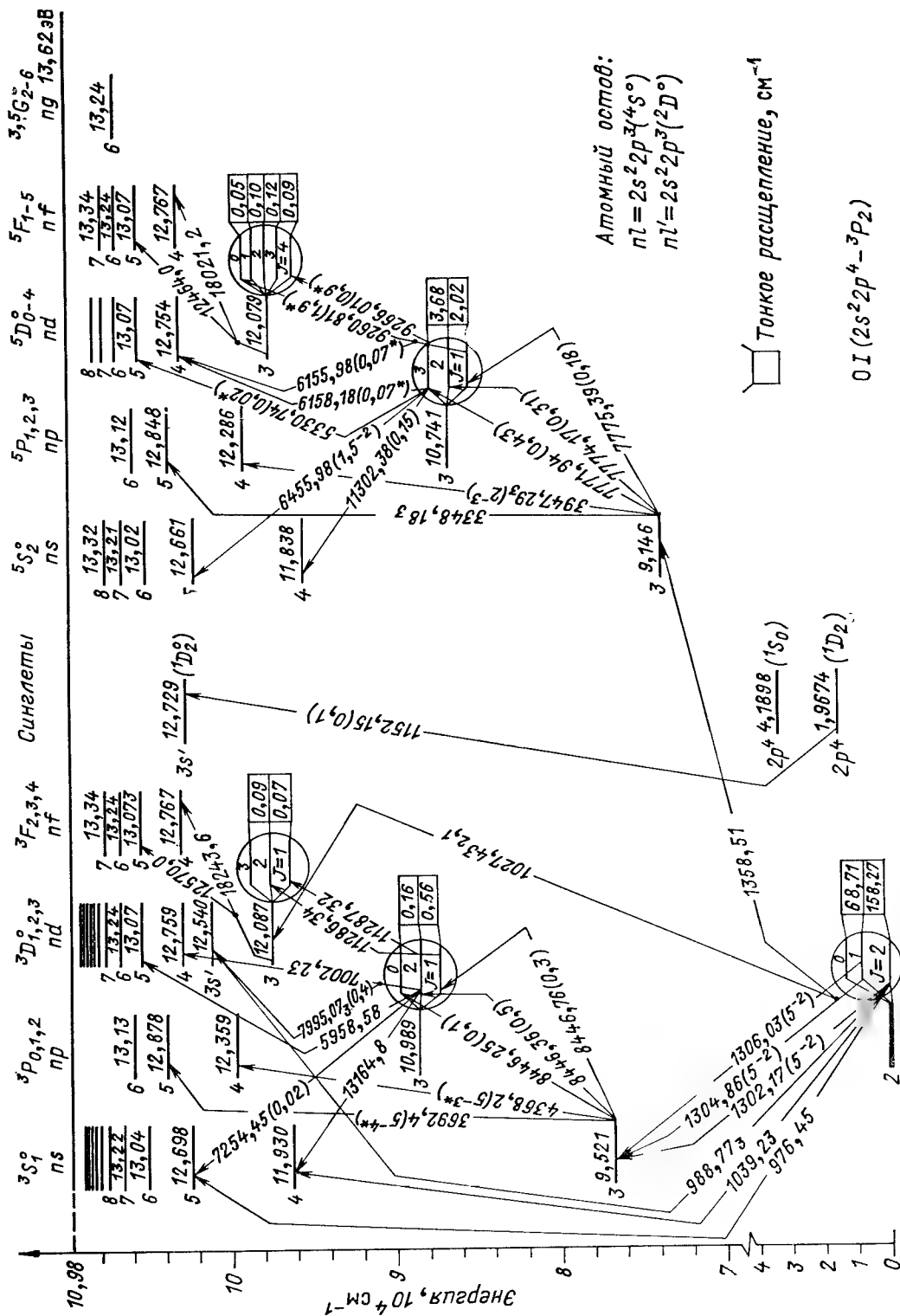
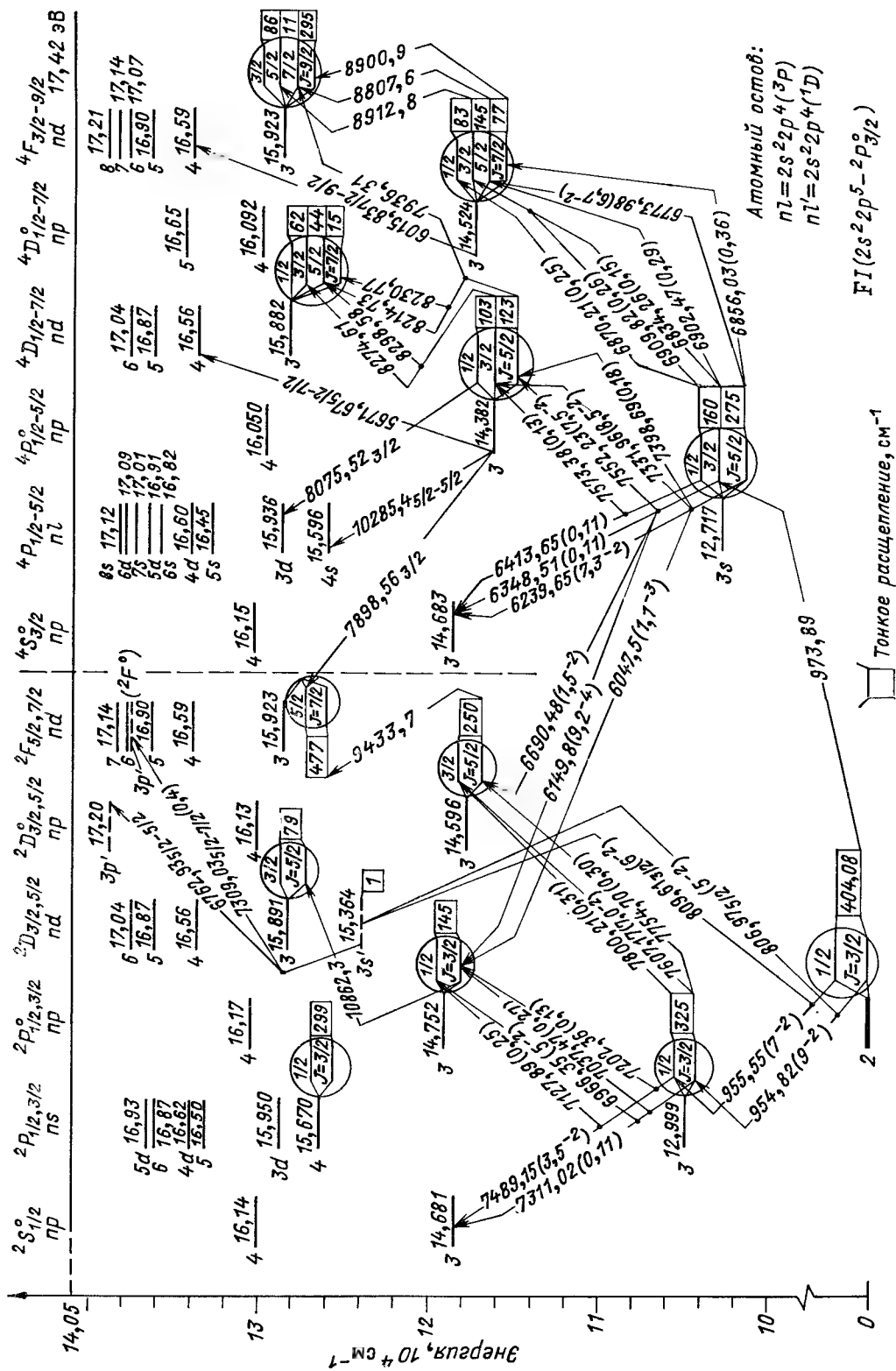


Рис. 32.9 Диаграмма Гротриана для атома ксенона







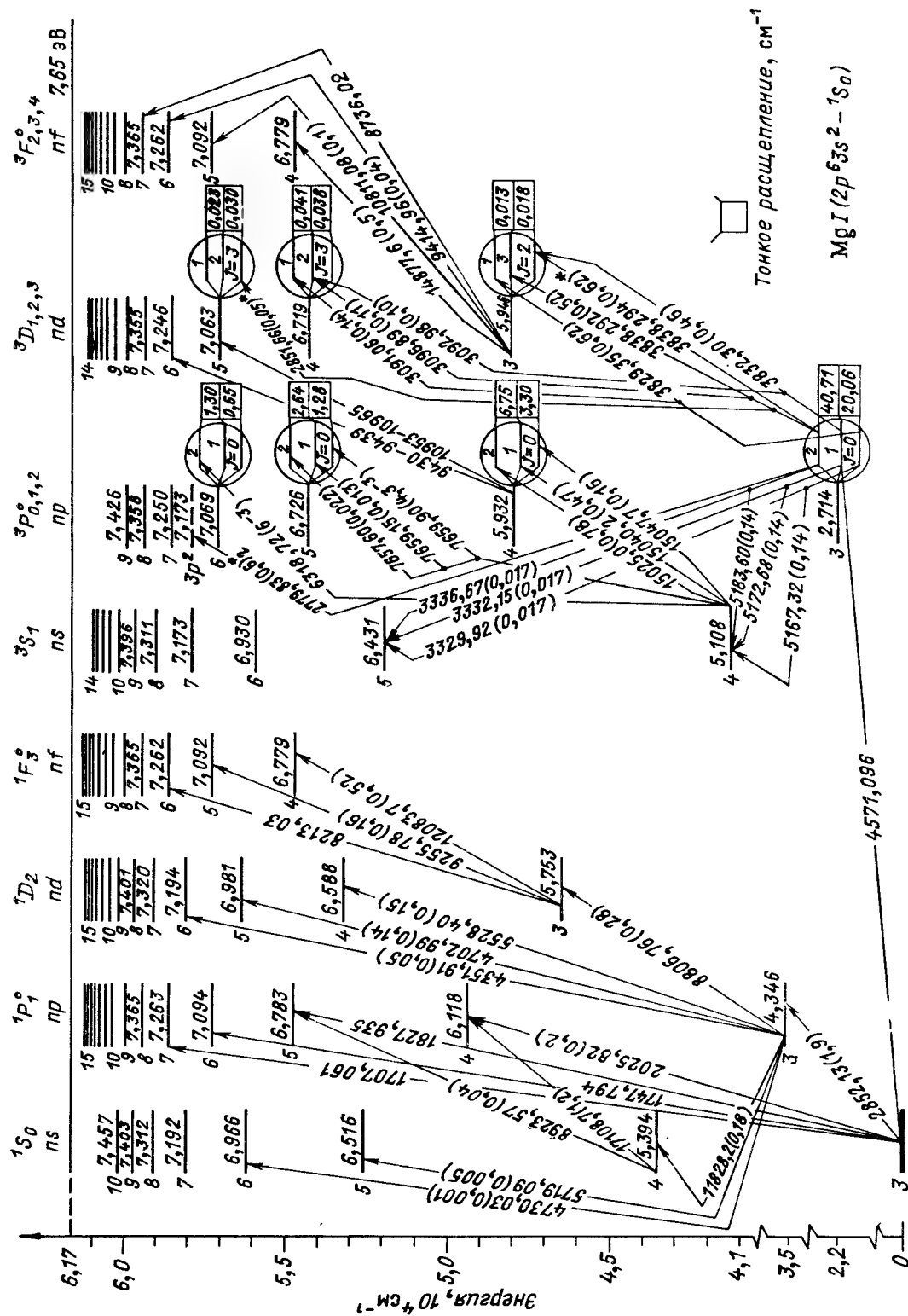


Рис. 32.13. Диаграмма Гроттриана для атома магния

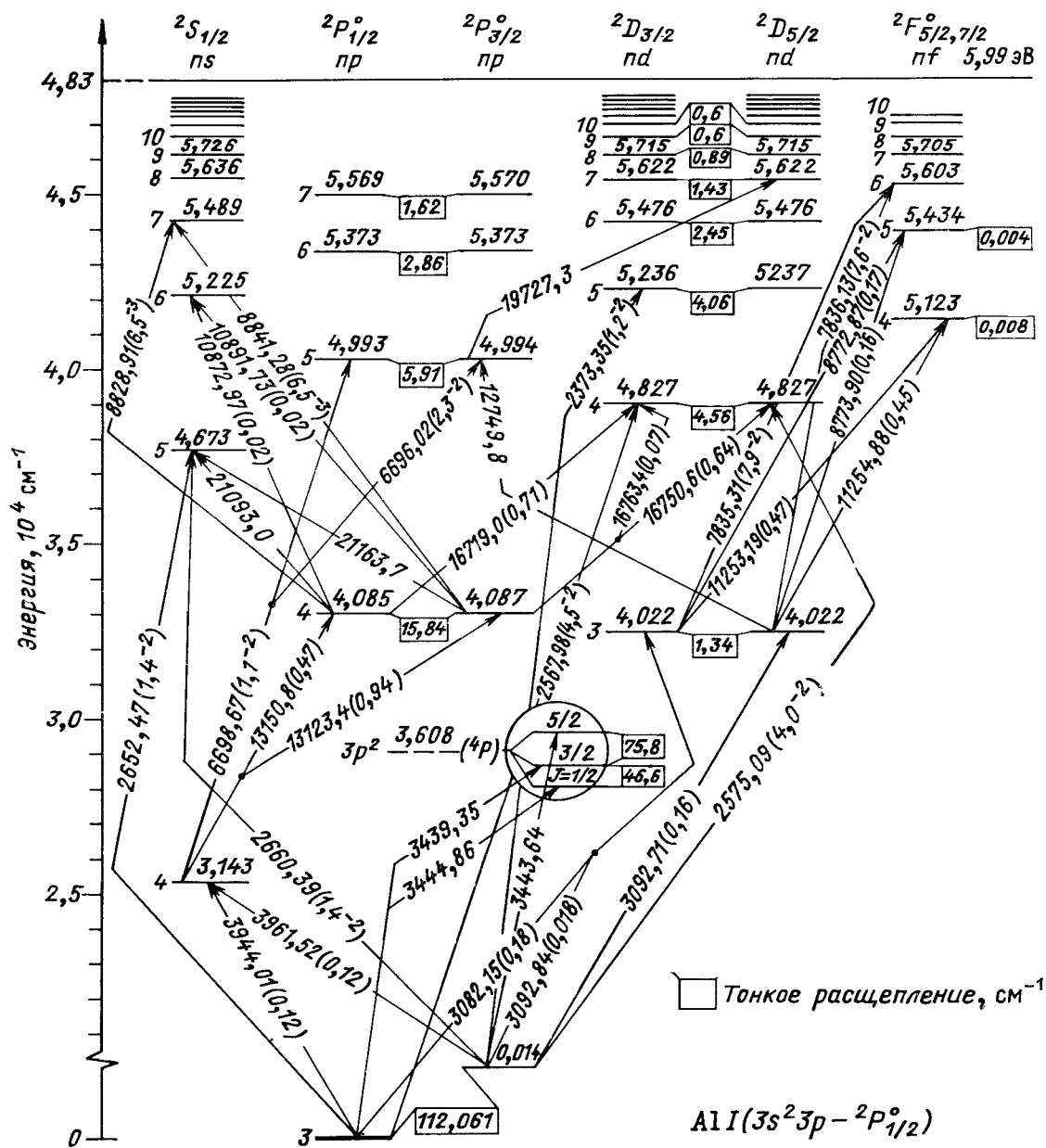


Рис. 32.14. Диаграмма Гроттриана для атома алюминия





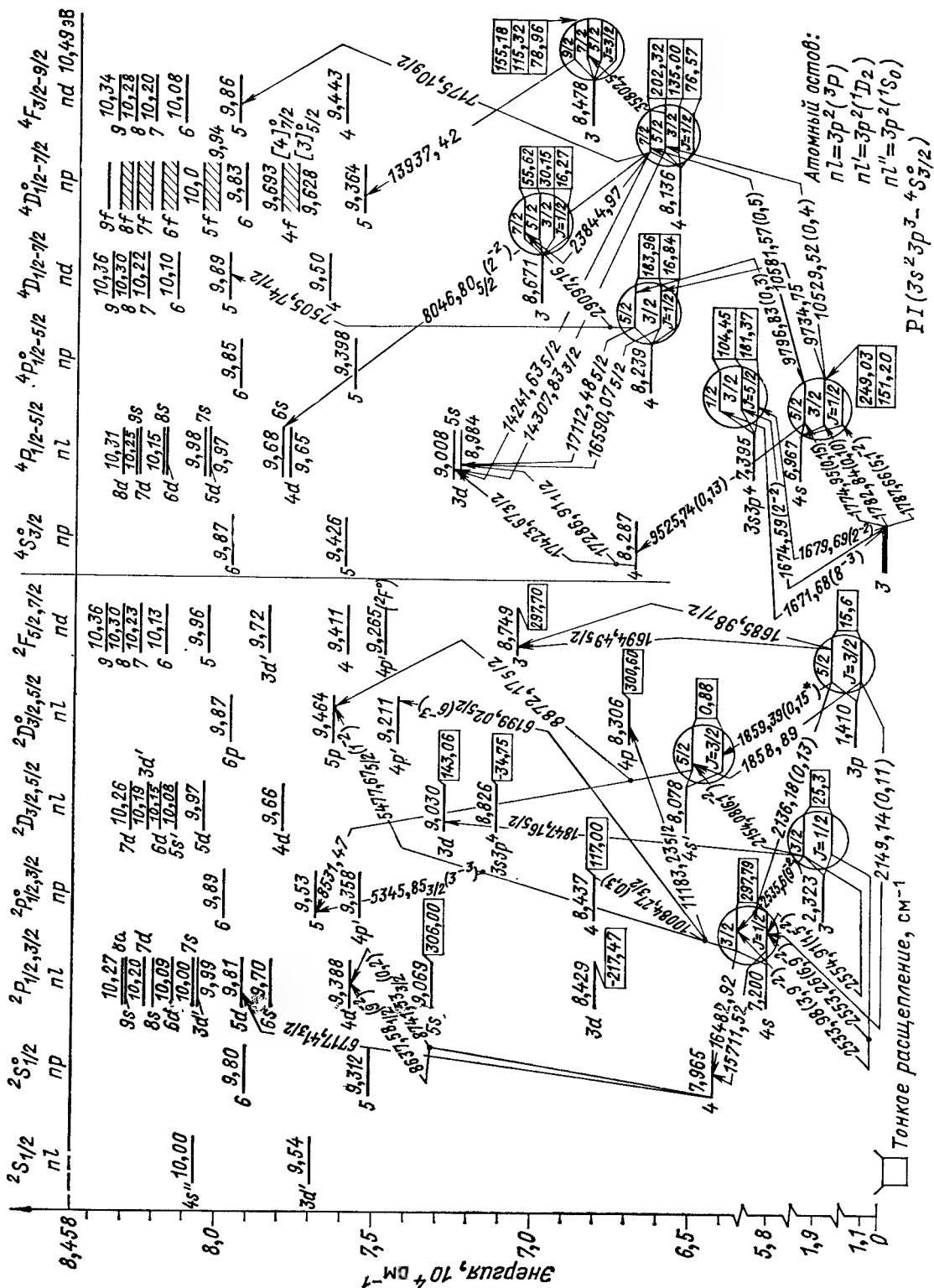


Рис. 32.16. Диаграмма Гроттриана для атома фосфора

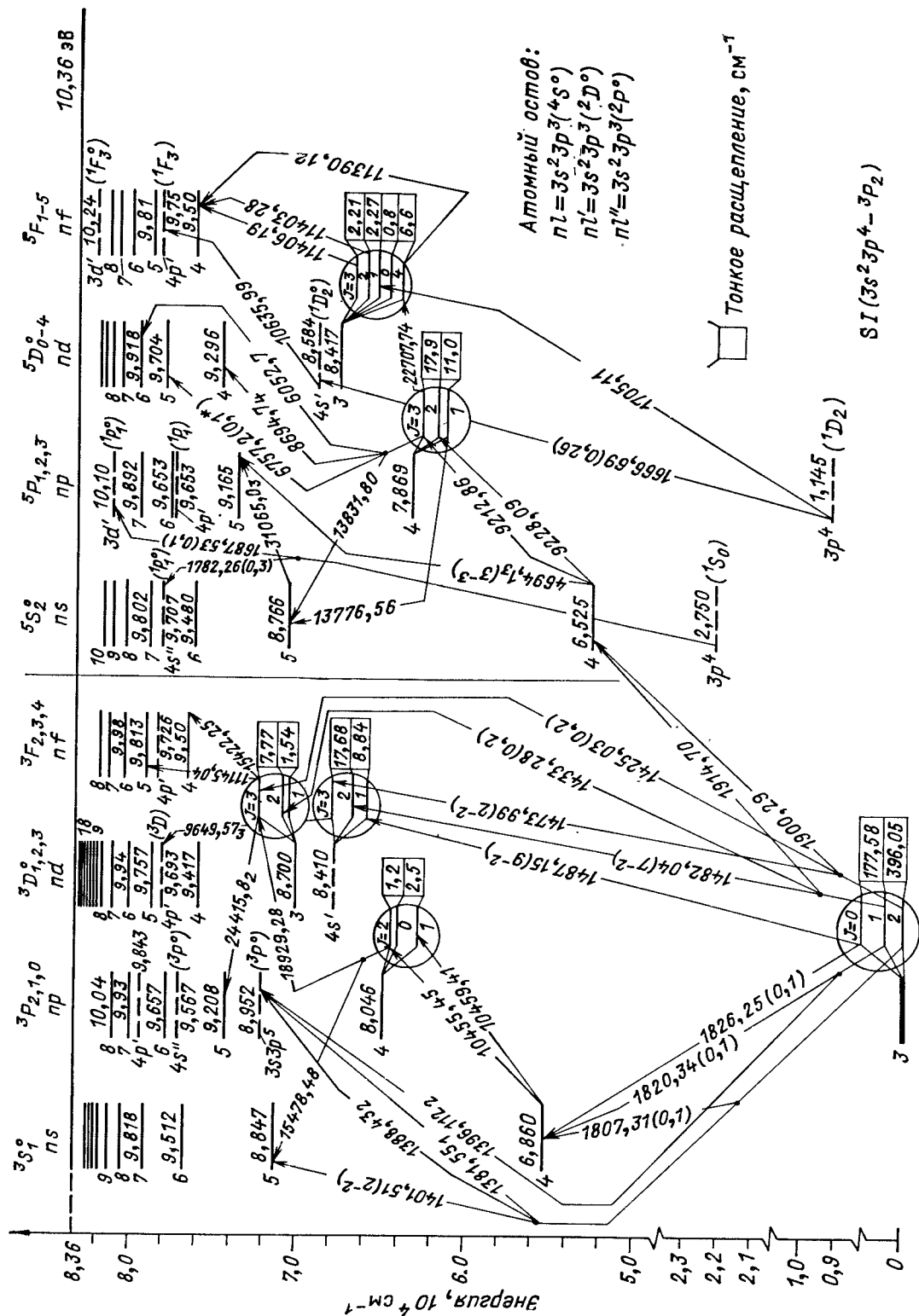


Рис. 32.17. Диаграмма Гротриана для атома серы

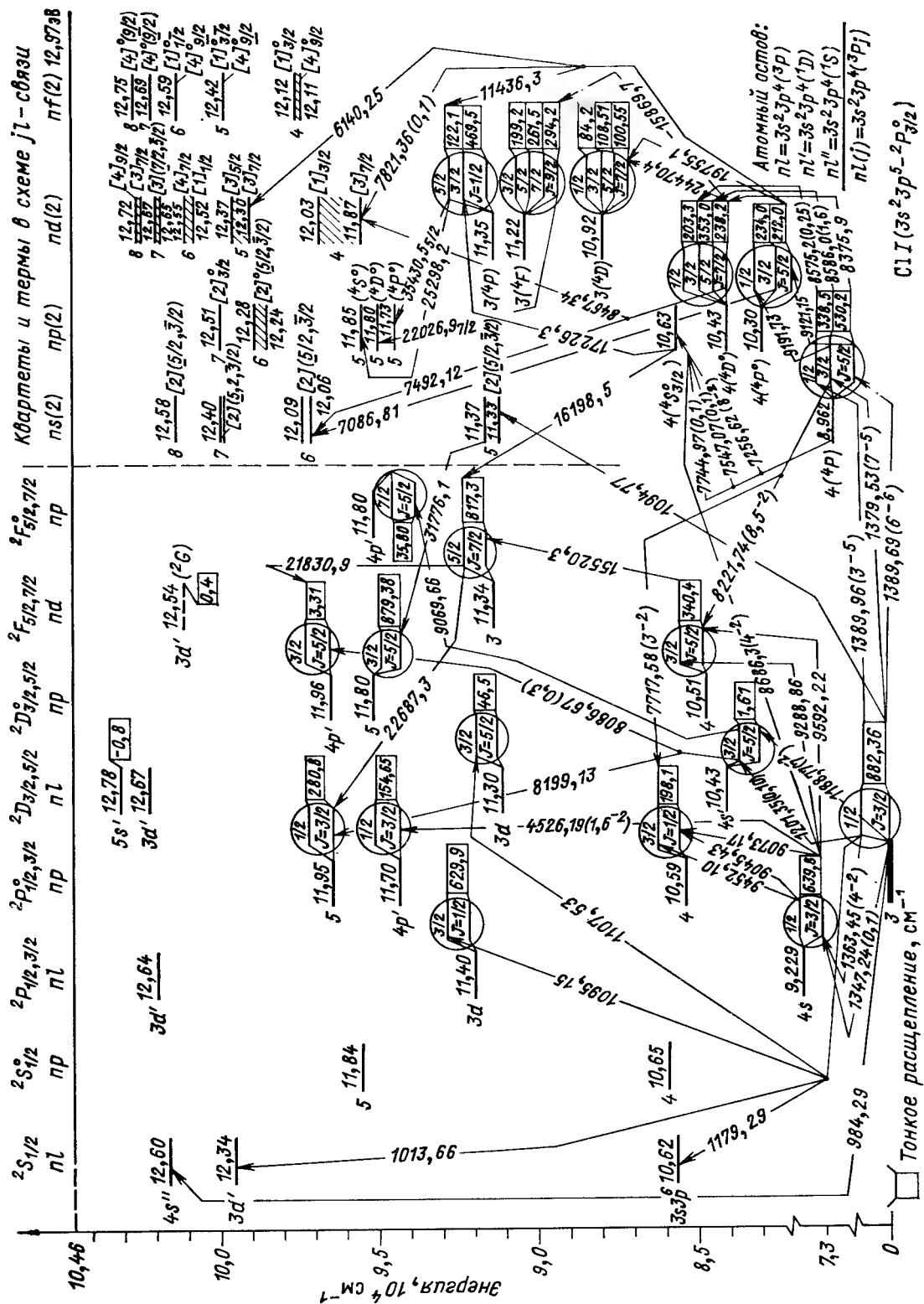


Рис. 32.18. Диаграмма Гротриана для атома хлора

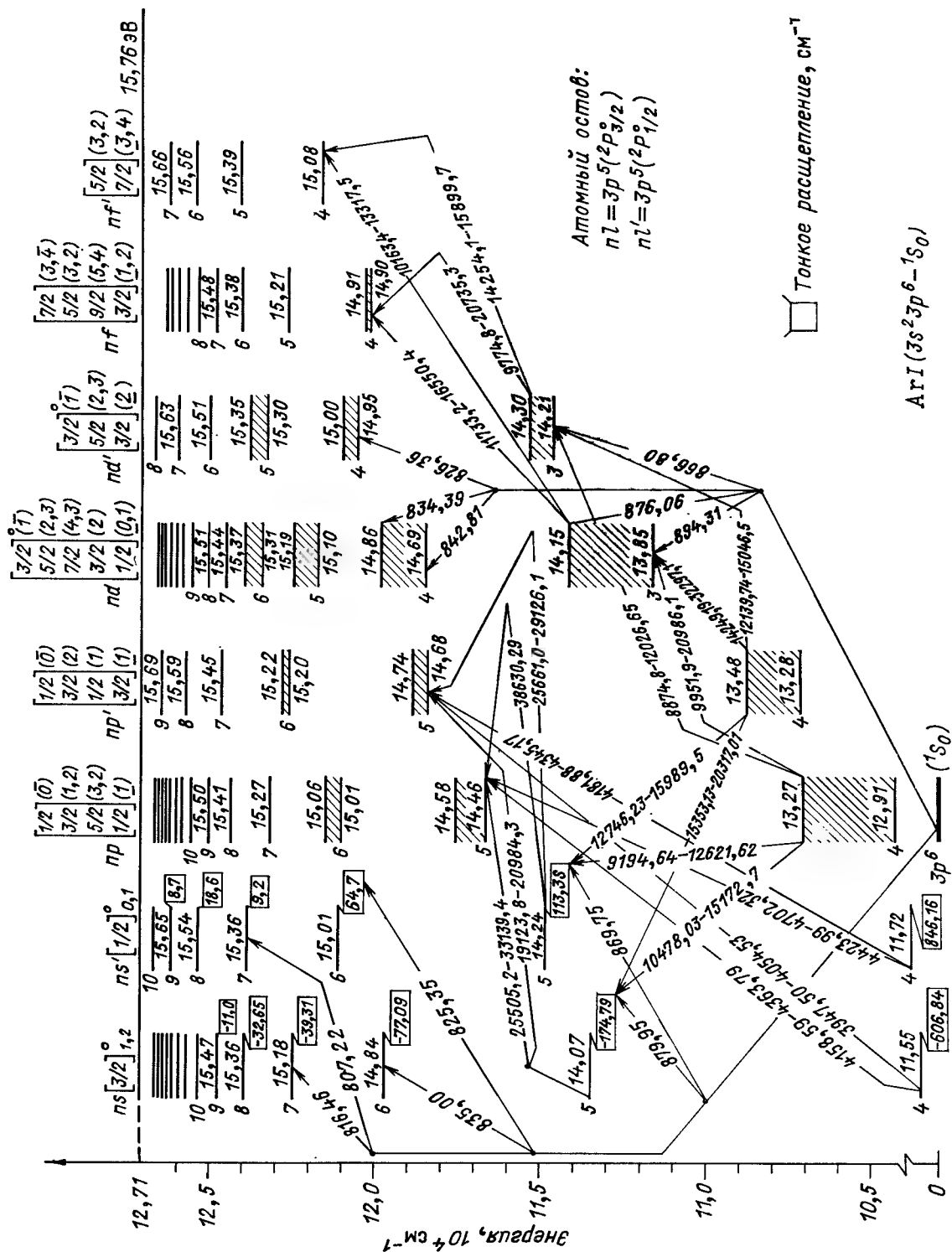


Рис. 32.19. Диаграмма Готтриана для атома аргона



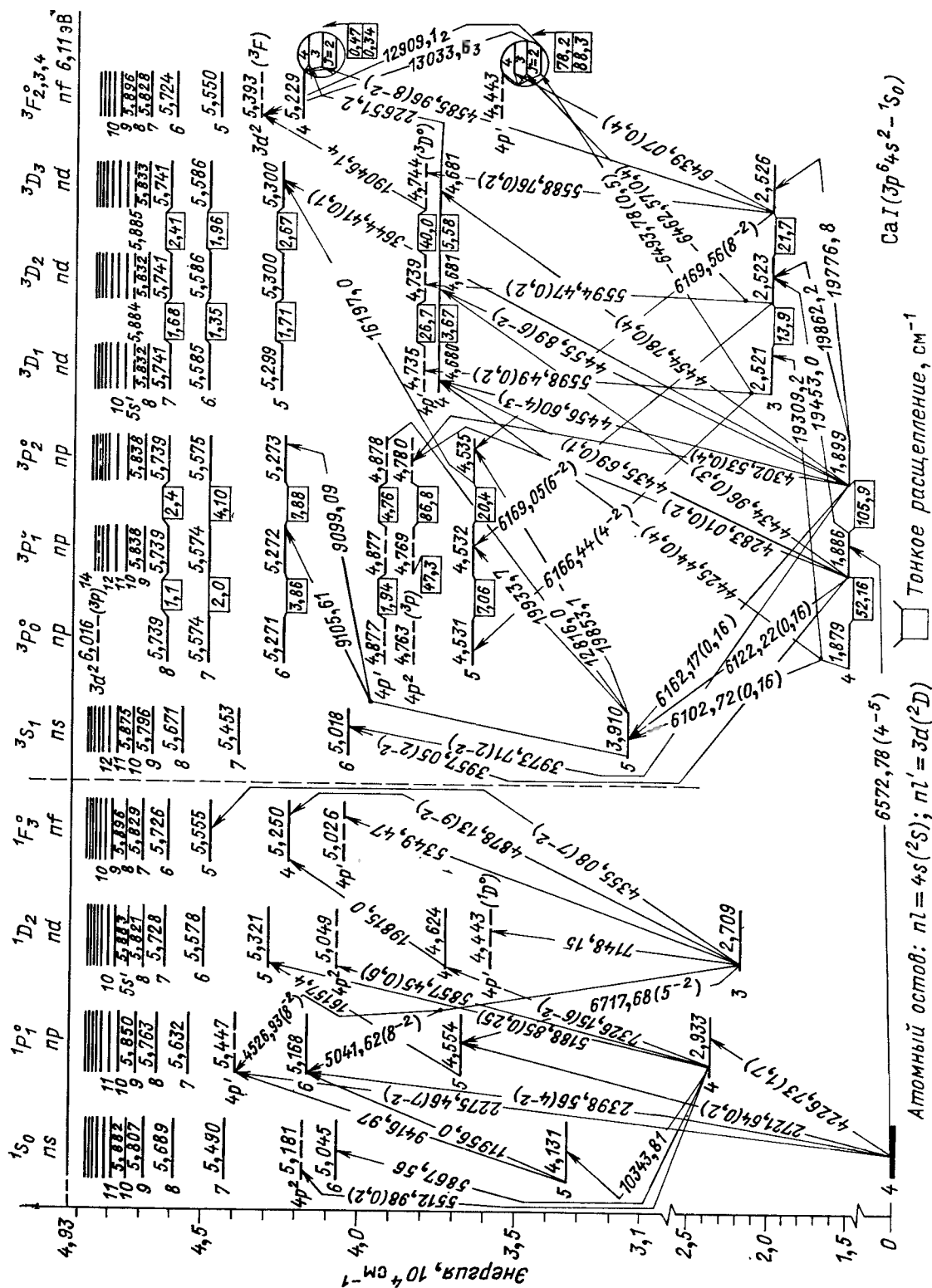


Рис. 32.21. Диаграмма Гротриана для атома кальция

| Четность (P)           | +1        | -1        | +1          | -1           | +1     | -1        | +1         | +1            |
|------------------------|-----------|-----------|-------------|--------------|--------|-----------|------------|---------------|
| Эл. конфигурация       | $3d^2 4s$ | $3d^2 4p$ | $3d^2 4s^2$ | $3d^2 4s 4p$ | $3d^3$ | $4s^2 4p$ | $3d^4 s^2$ | $3d^4 s^2 4d$ |
| Мультиплетность (2S+1) | 2         | 4         | 2           | 4            | 2      | 4         | 2          | 4             |

6,562 эВ

 $e^4 G^4, 954$  $\frac{4,826}{e^2 F} f^4 D^4, 930$  $\frac{4,690}{g^2 D}$  $\frac{4,860}{e^2 H}$  $\frac{4,590 e^2 G}{f^2 D} e^2 P^4, 603$  $\frac{4,530}{e^4 P} e^4 P$  $\frac{4,428}{e^2 D}$  $\frac{4,277}{e^4 D}$  $\frac{y^2 G^4, 886}{z^2 H^4, 861}$  $\frac{y^4 P^4, 703}{z^4 S^4, 600}$  $\frac{4,572}{w^2 F^4, 551} x^4 D^4$  $\frac{4,382}{z^2 S^4}$  $\frac{4,055}{x^2 F^4, 119} y^4 D^4$  $\frac{4,055}{z^2 G^4, 105} y^4 D^4$  $\frac{3,878}{y^4 F^4}$  $\frac{3,618}{z^4 G^4}$  $\frac{3,340}{a^2 S^4}$  $\frac{2,567}{a^2 P^4}$  $\frac{2,509}{a^2 G^4}$  $\frac{2,110}{b^2 D^4}$  $\frac{2,142}{a^4 P^4}$  $\frac{1,859}{a^2 F^4}$  $\frac{1,15,8}{a^4 F^4}$  $\frac{1,439}{a^4 F^4}$  $\frac{67,1}{51,2}$  $\frac{52,6}{37,7}$  $\frac{51,2}{168,3}$  $\frac{51,2}{168,3}$  $\frac{51,2}{168,3}$  $\frac{51,2}{168,3}$  $\frac{51,2}{168,3}$  $\frac{51,2}{168,3}$ 

5,29

4,0

3,5

3,0

2,5

2,0

1,5

1,0

0

Энергия,  $10^4 \text{ см}^{-1}$ Тонкое расщепление,  $\text{см}^{-1}$  $ScI(3d^4 s^2 - 2D_{3/2})$





6,74 3B
$$VI(3d^34s^2-4F_{3/2})$$

|                                                      |           |   |    |   |    |   |    |   |    |   |   |   |
|------------------------------------------------------|-----------|---|----|---|----|---|----|---|----|---|---|---|
| Четность (P)                                         | +1        |   | -1 |   | +1 |   | -1 |   | +1 |   |   |   |
| Эл. конфигурация                                     | $3d^5 4s$ |   |    |   |    |   |    |   |    |   |   |   |
| Мультиплетность (2S+1)                               | 7         | 5 | 3  | 1 | 7  | 5 | 3  | 1 | 7  | 5 | 3 | 1 |
|                                                      |           |   |    |   |    |   |    |   |    |   |   |   |
| <div><div>5,46 eV</div><div>3,5 eV</div></div>       |           |   |    |   |    |   |    |   |    |   |   |   |
| 6,766 эВ                                             |           |   |    |   |    |   |    |   |    |   |   |   |
| <div><div><math>\frac{4,401}{c5D}</math></div></div> |           |   |    |   |    |   |    |   |    |   |   |   |

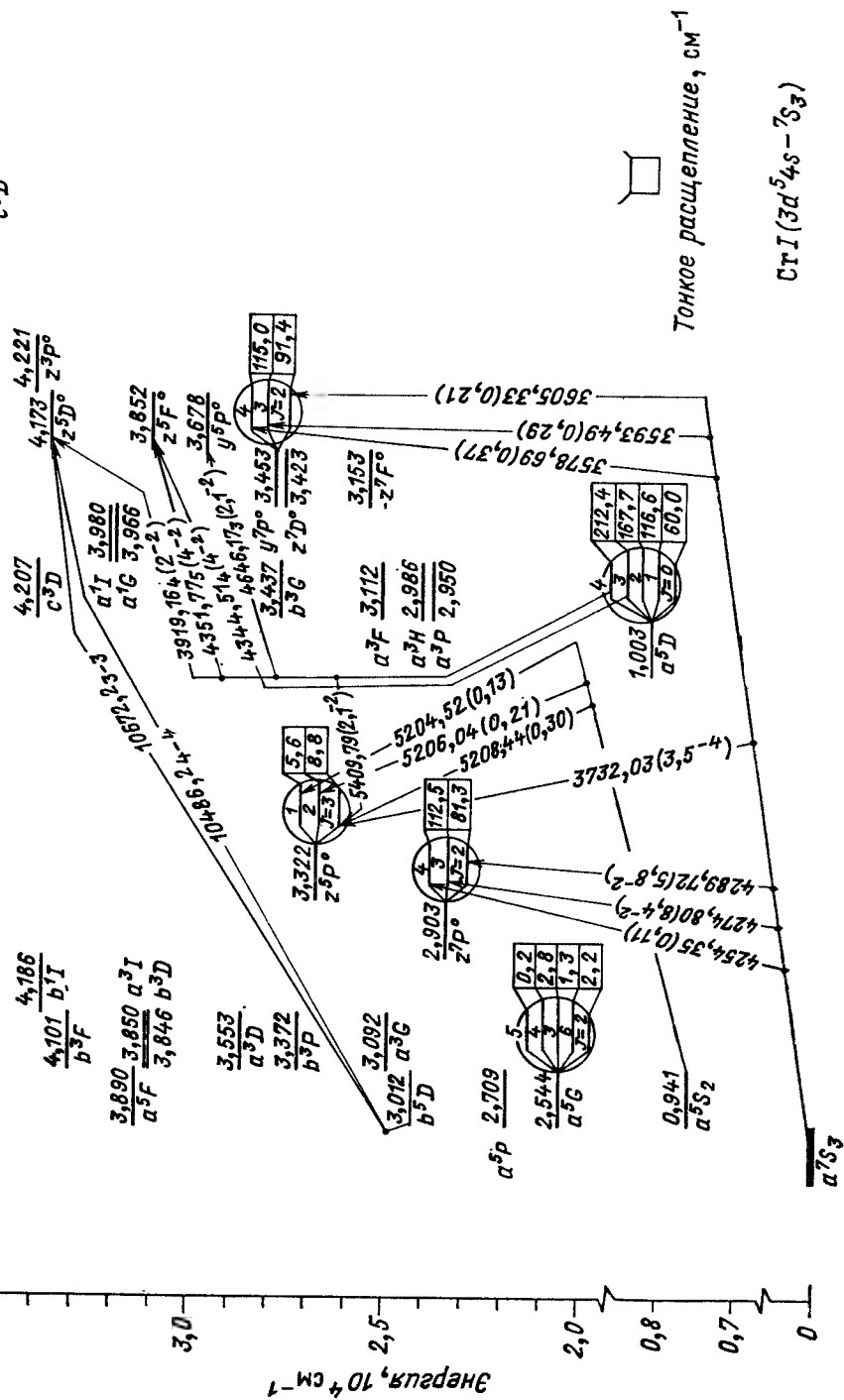
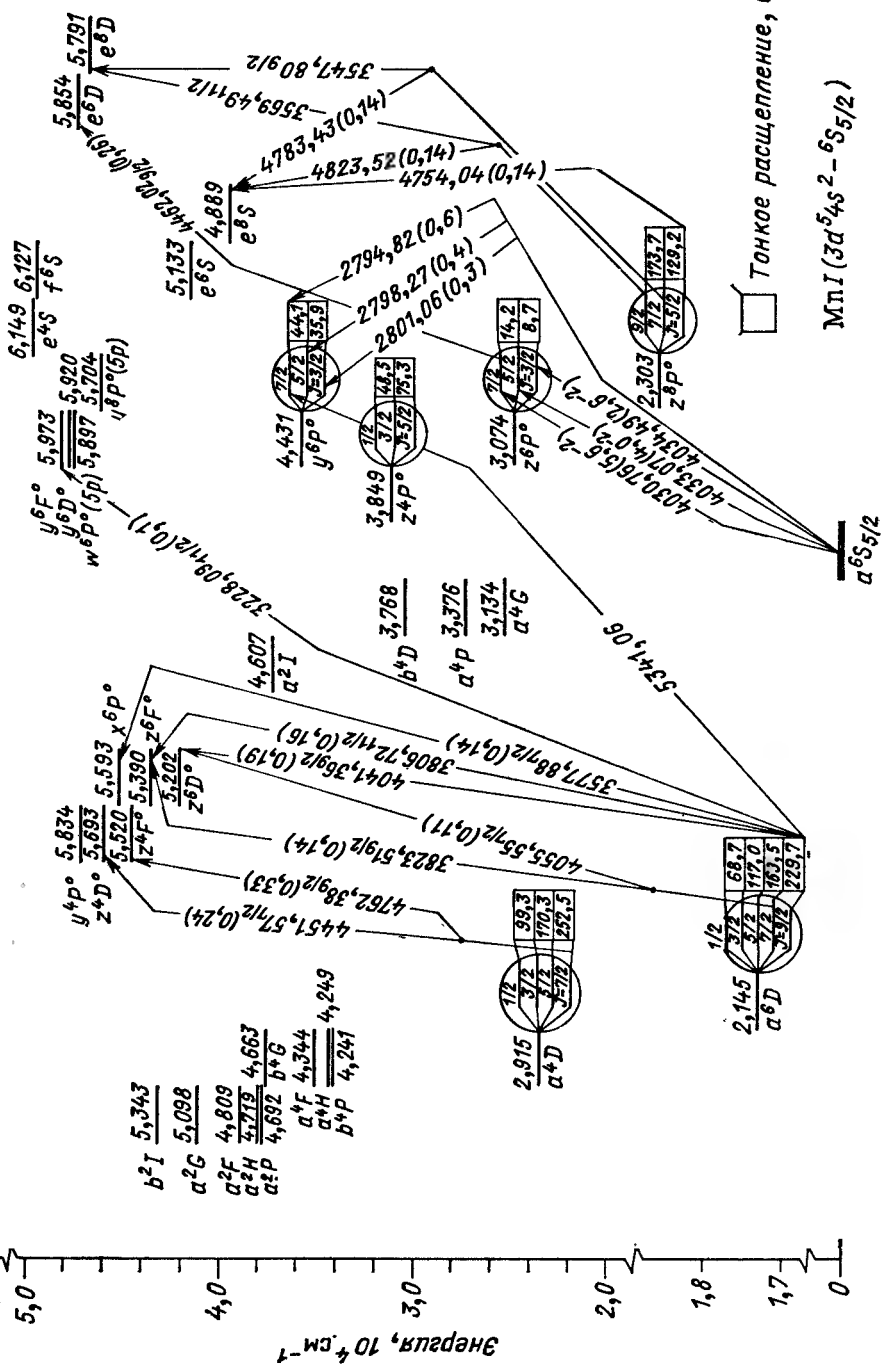


Рис. 32.25. Диаграмма Гротриана для атома хрома



**Рис. 32.26. Днаграмма Гротриана для атома марганца**



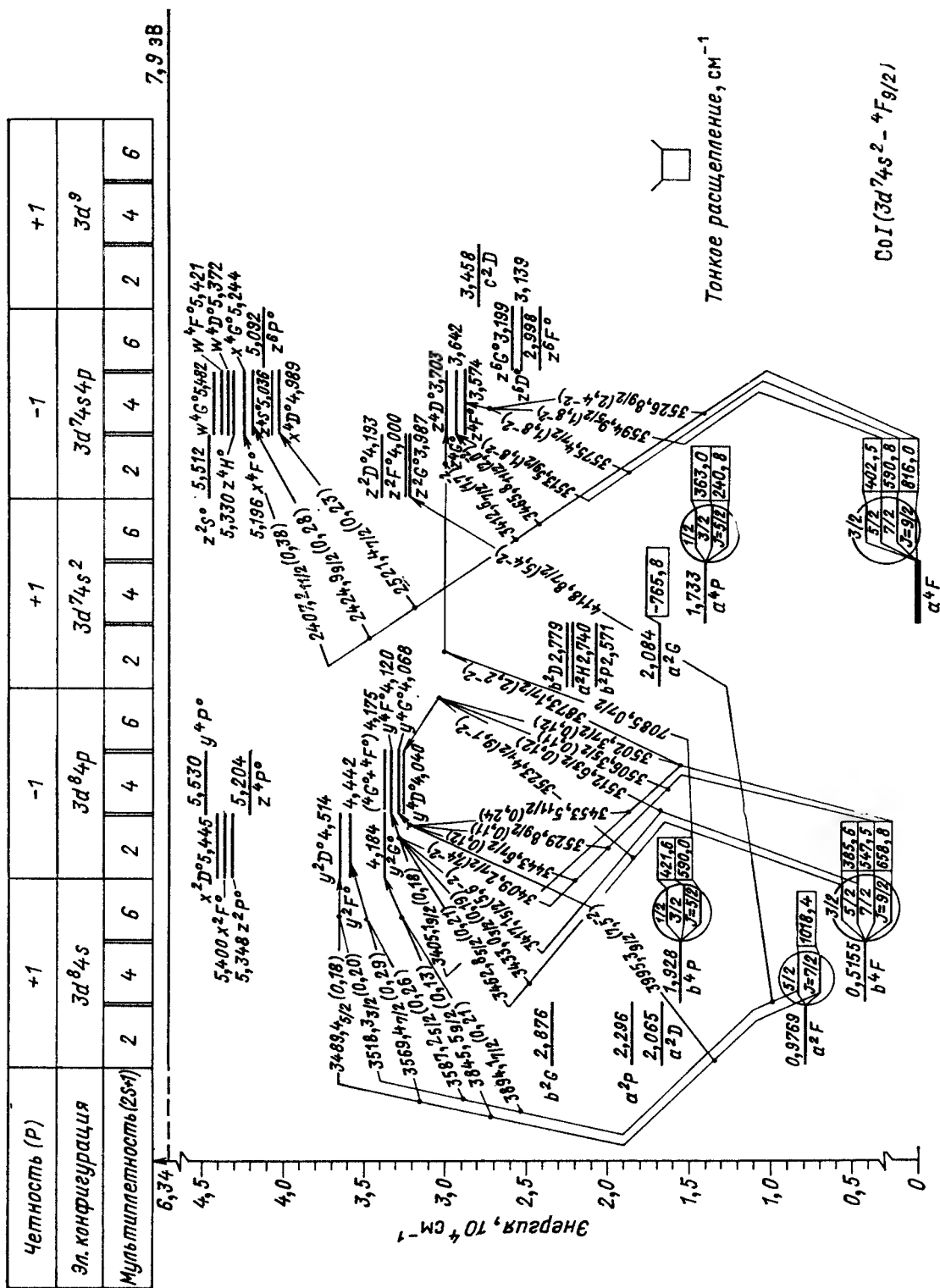


Рис. 32.28. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

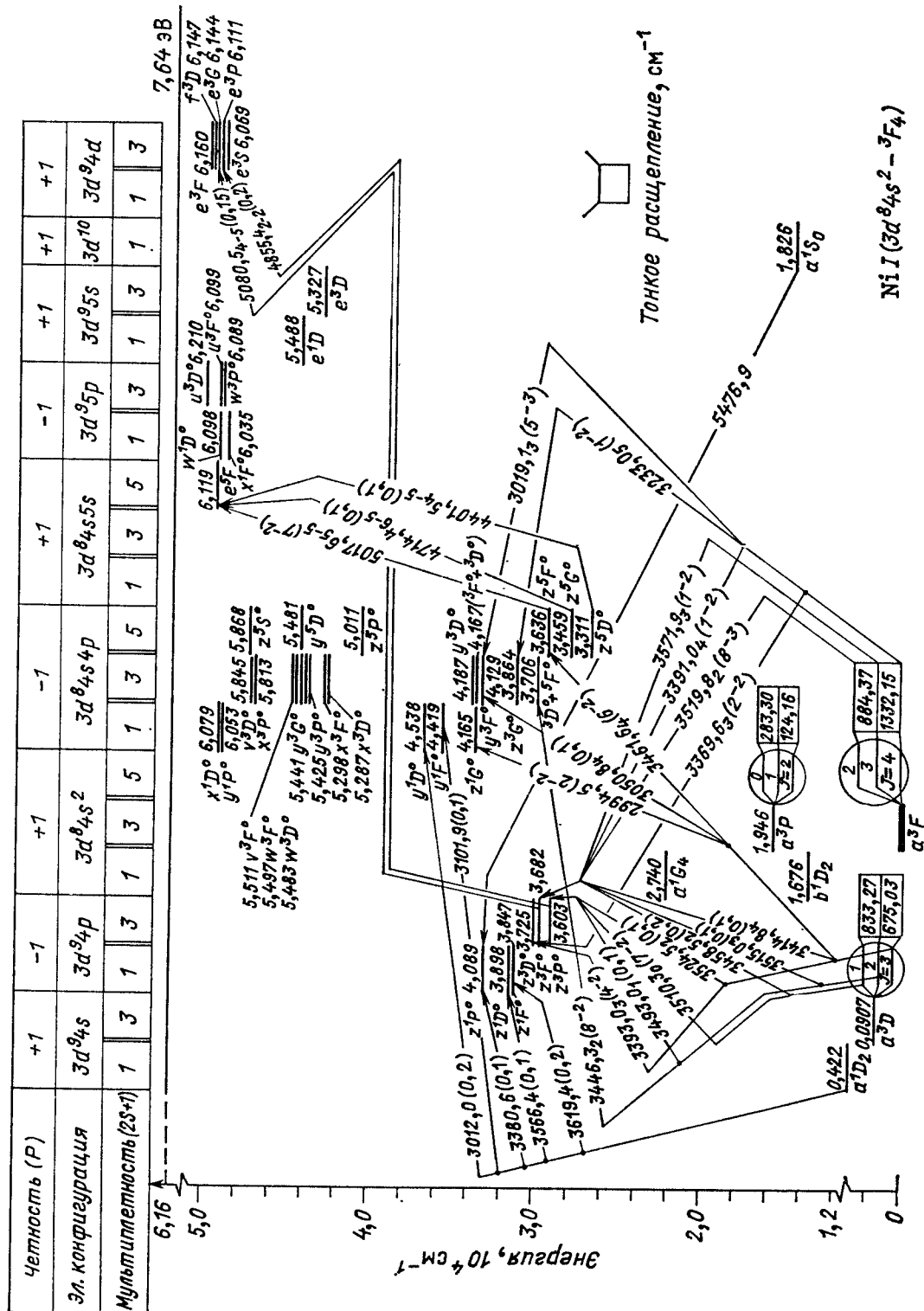


Рис. 32.29. Диаграмма Гротриана для атома никеля

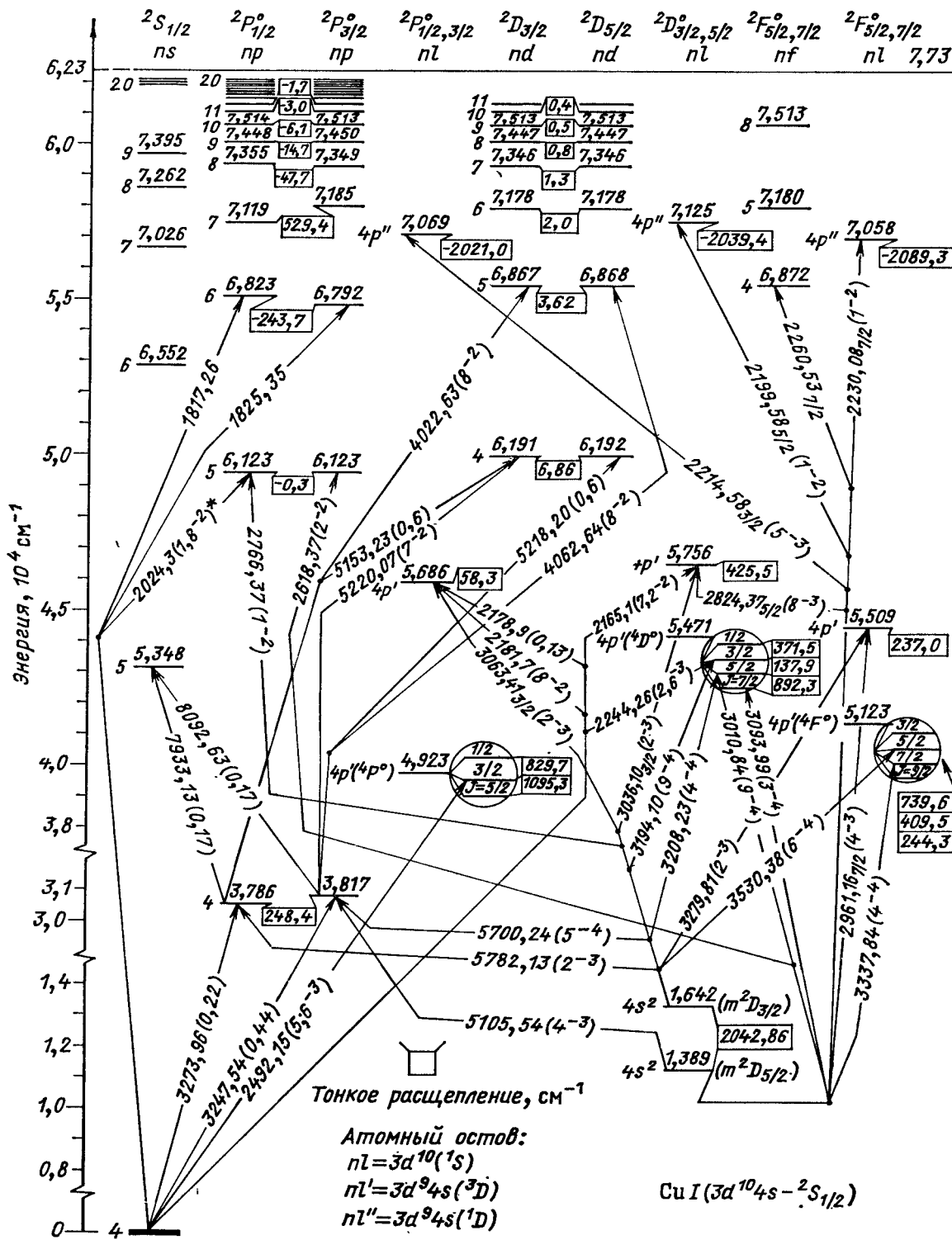


Рис. 32.30. Диаграмма Гроттриана для атома меди





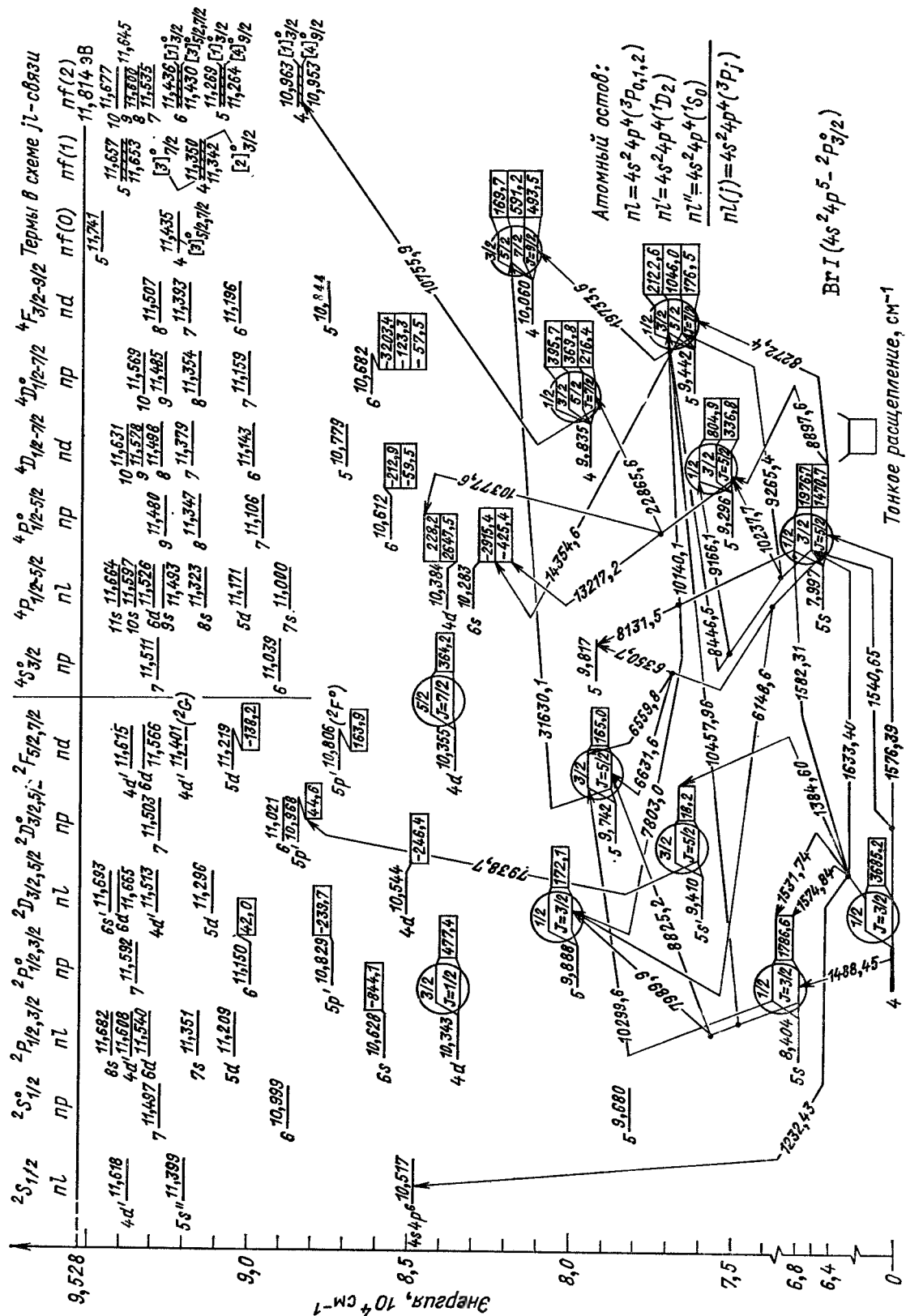


Рис. 32.32. Диаграмма Гротриана для атома брома

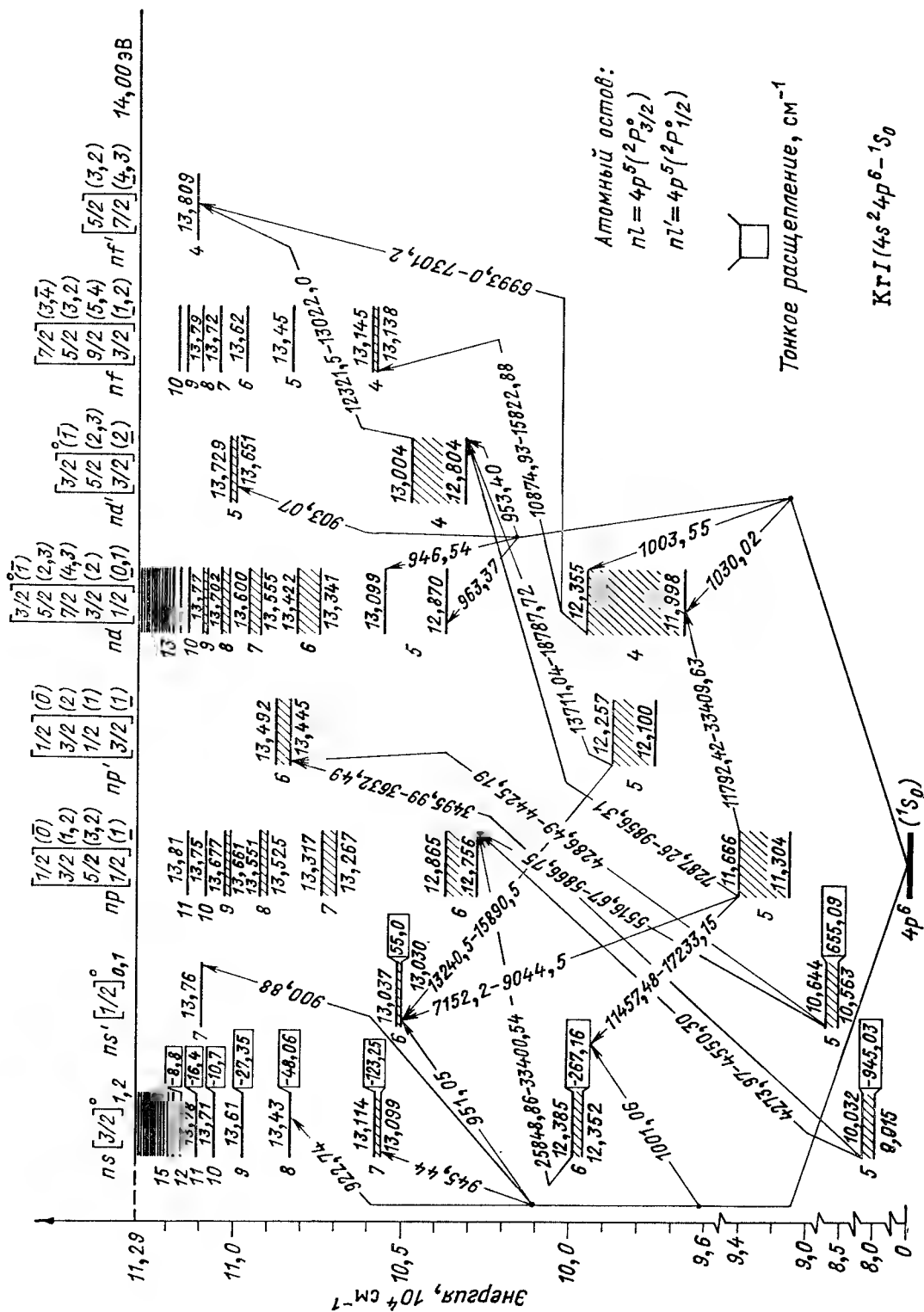


Рис. 32.33. Диаграмма Гротриана для атома криптона

628



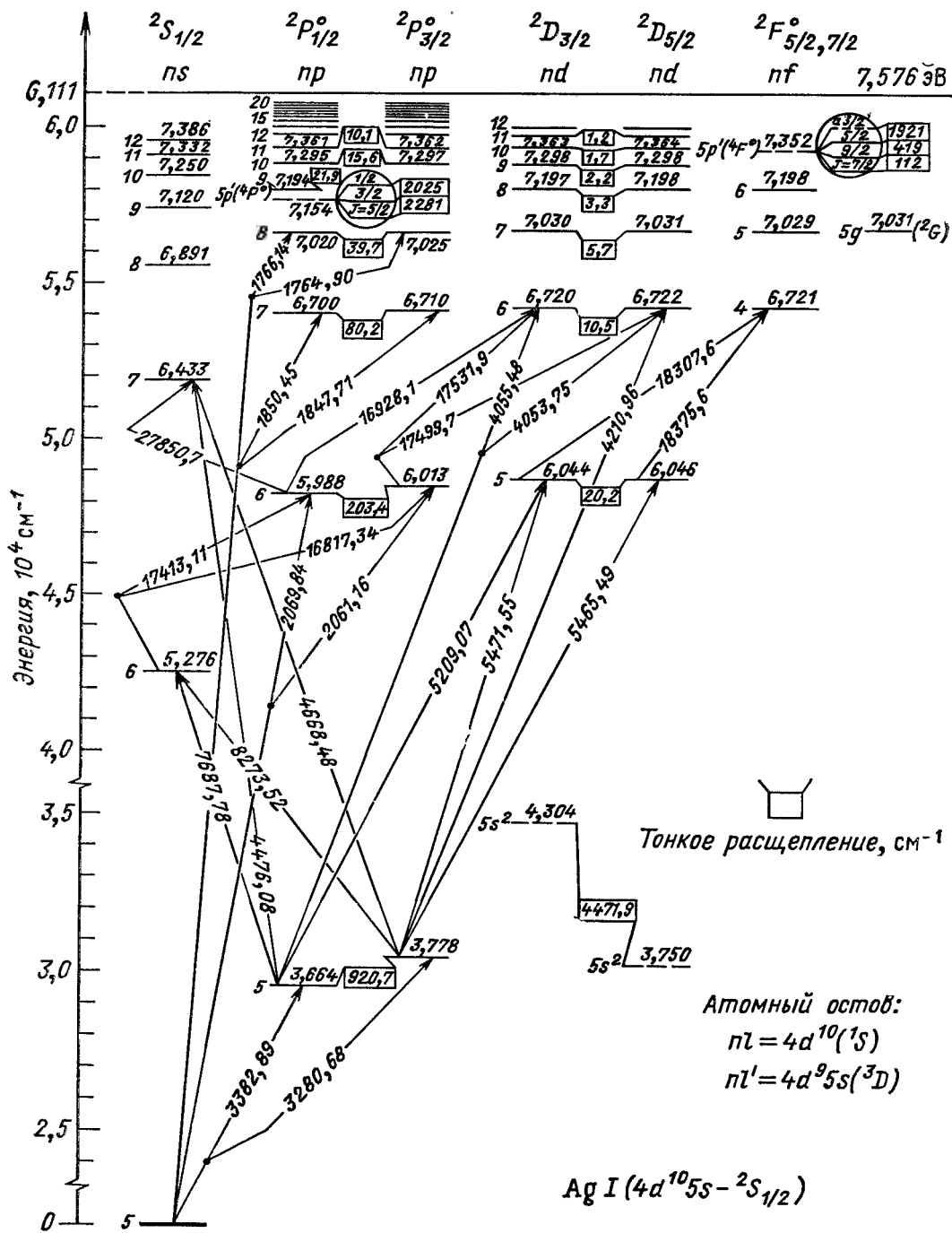


Рис. 32.36. Диаграмма Гроттриана для атома серебра



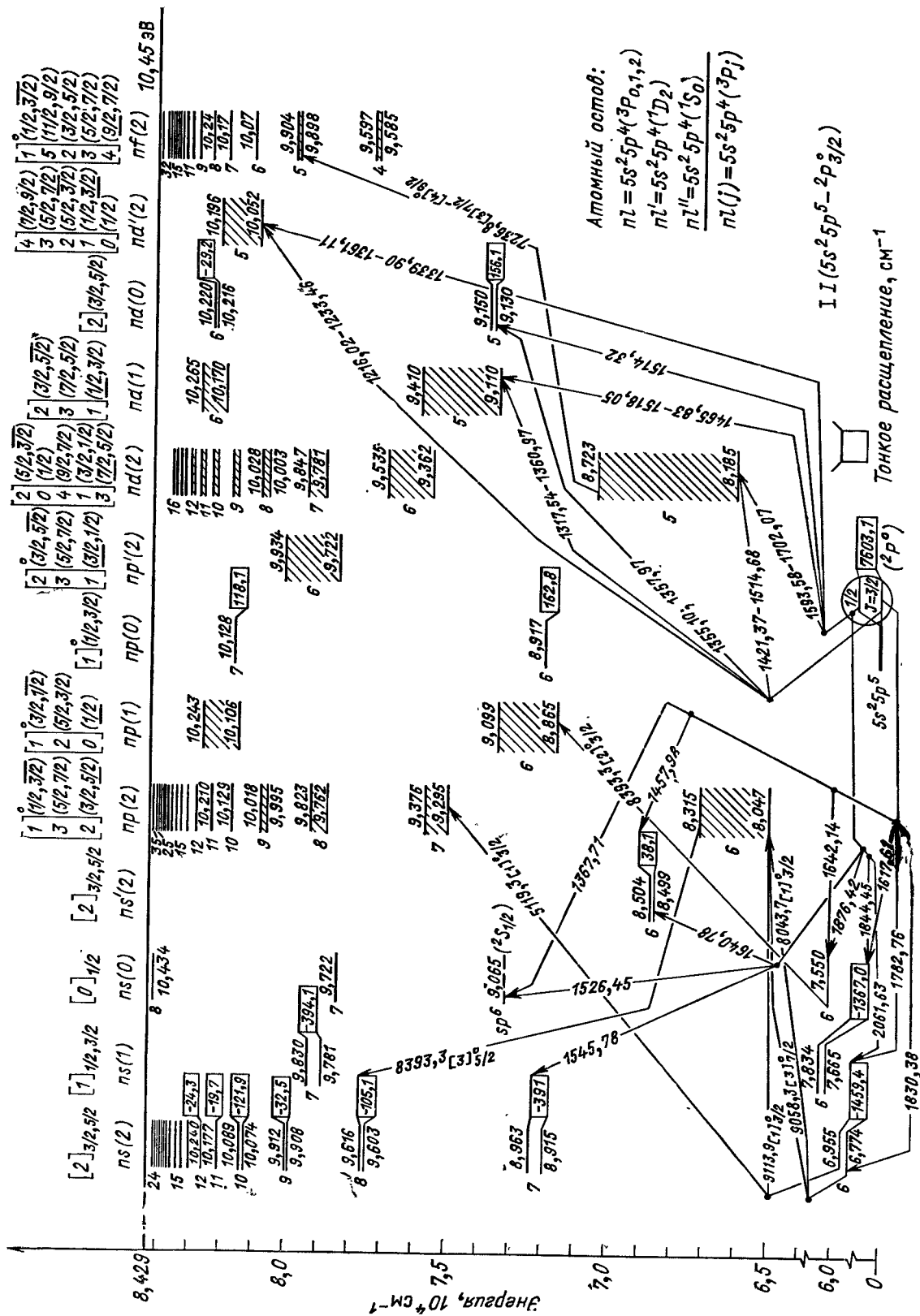


Рис. 32.38. Диаграмма Гротриана для атома иода

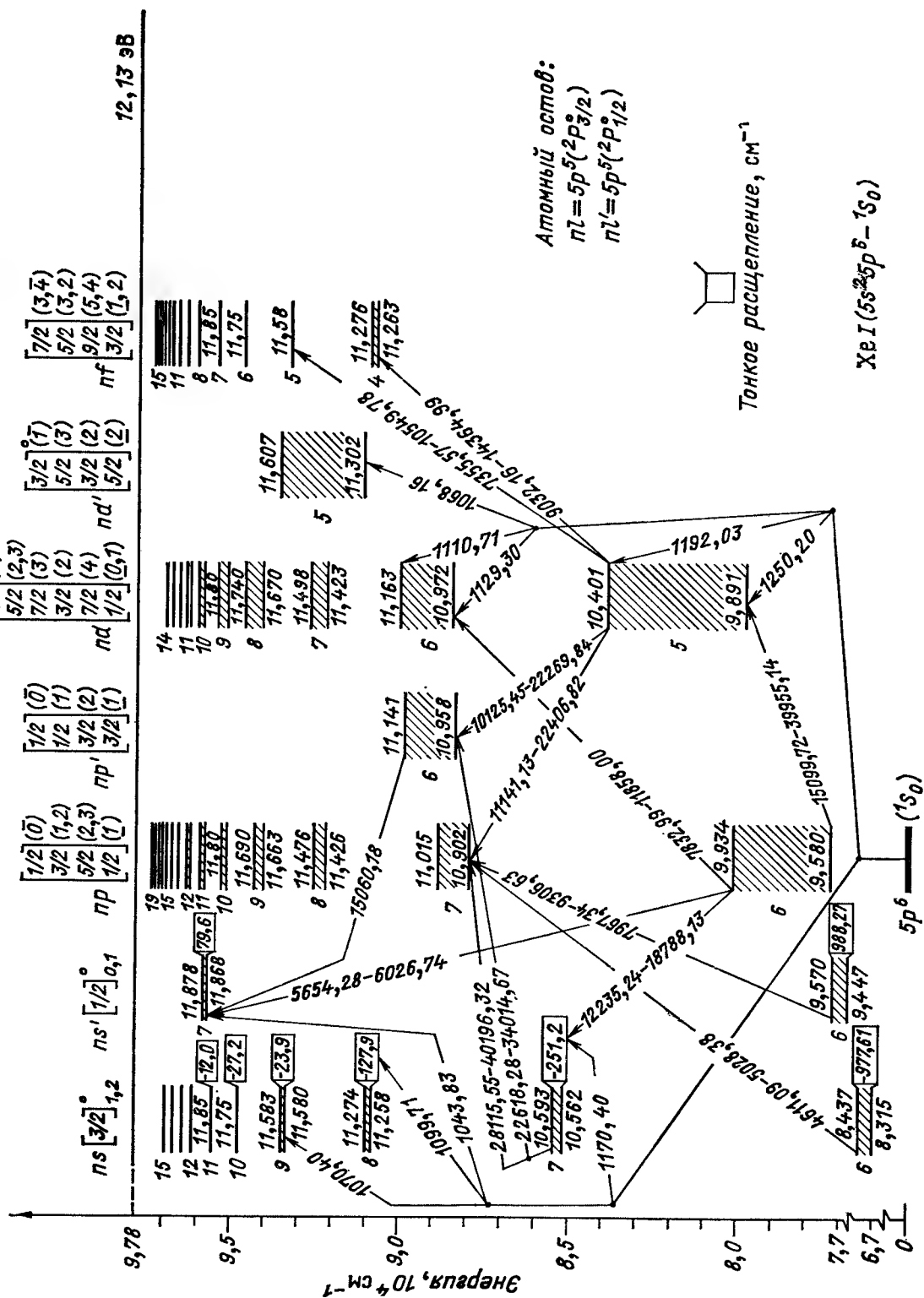


Рис. 32.39. Диаграмма Гротриана для атома ксенона



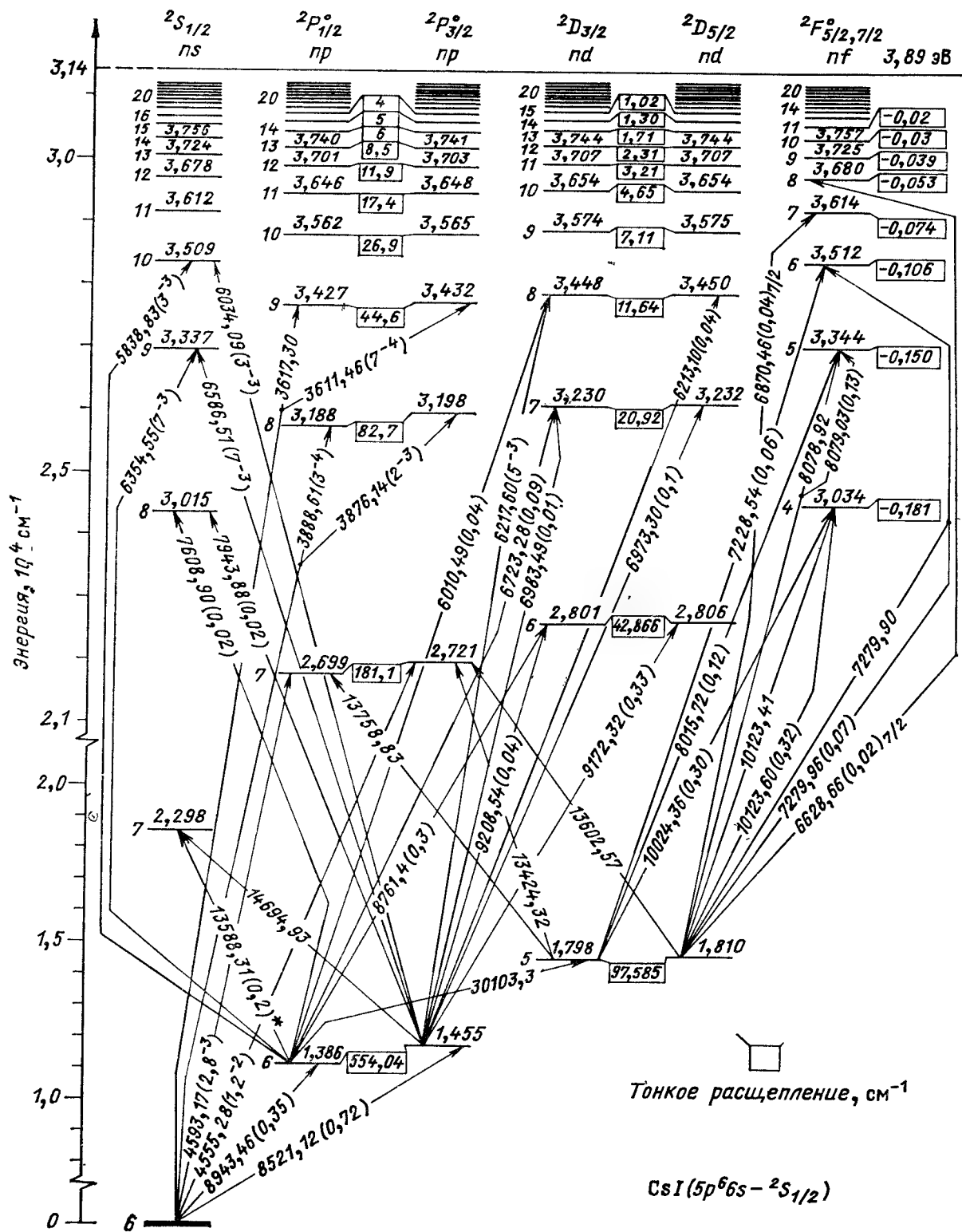


Рис. 32.40. Диаграмма Гроттриана для атома цезия

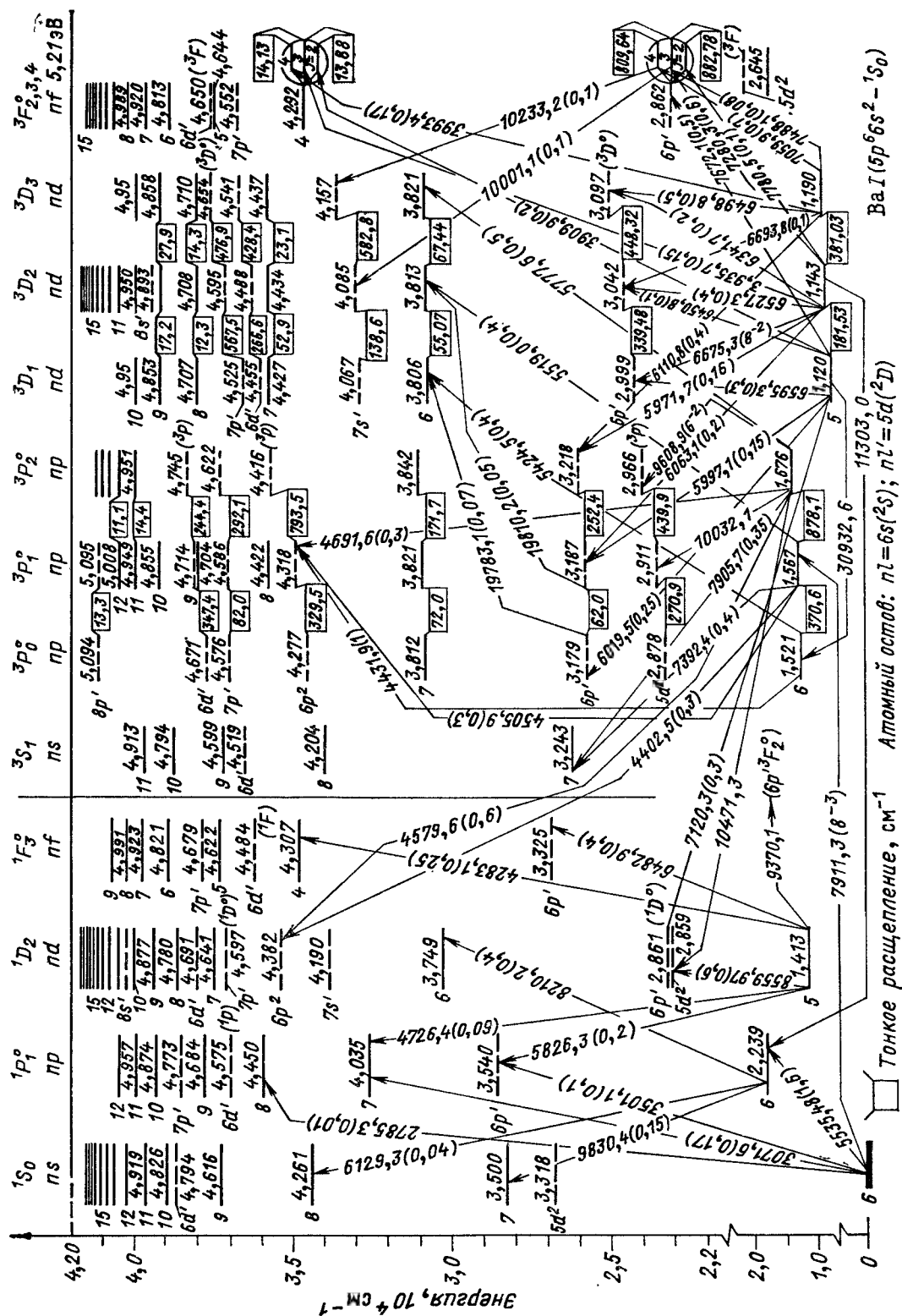


Рис. 32.41. Диаграмма Гроттриана для атома бария

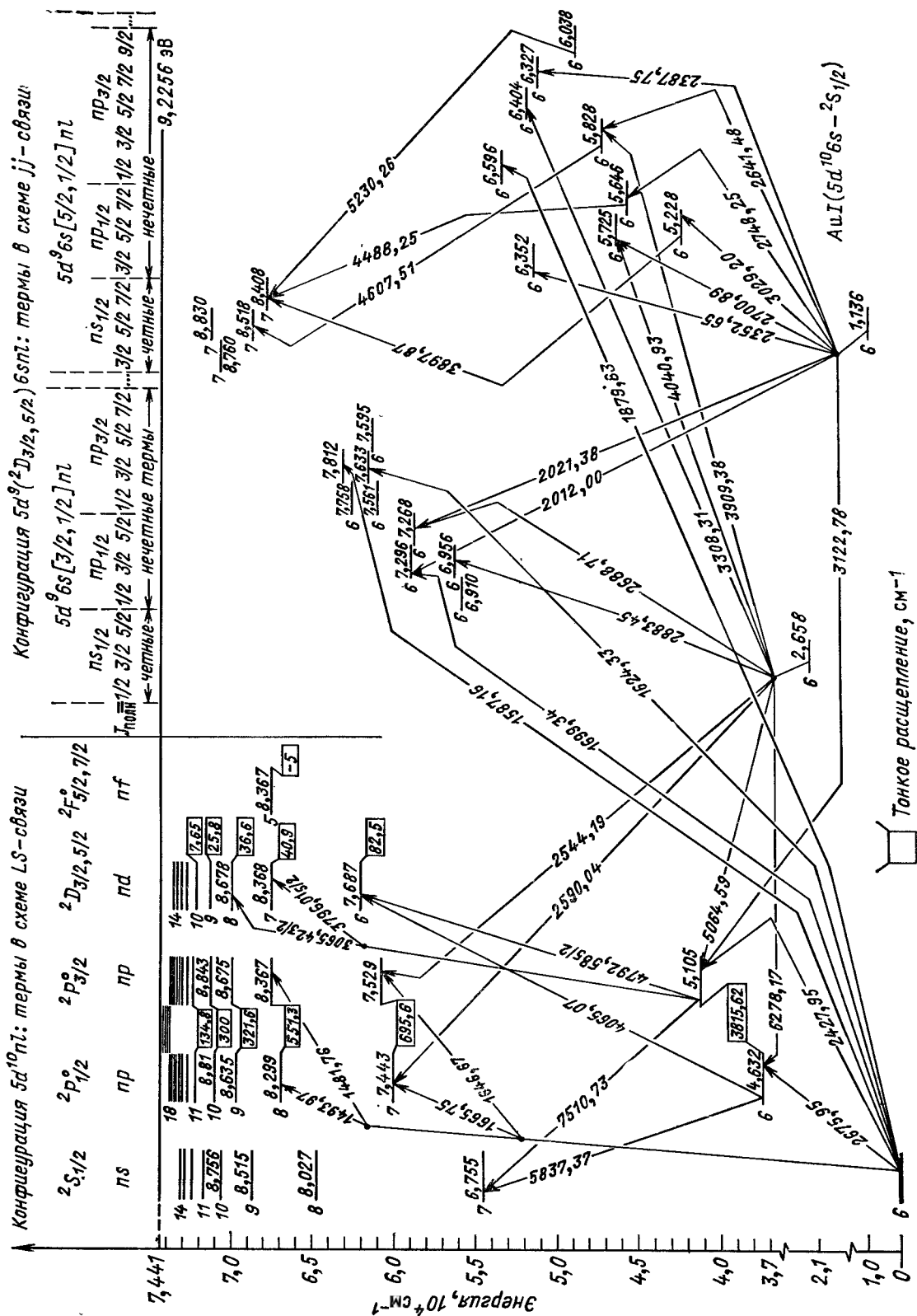


Рис. 32.42. Диаграмма Гроттрона для атома золота



же диаграммами Гротриана) для первых 30 элементов таблицы Менделеева, ряда атомов с валентной электронной оболочкой вида  $ns$ ,  $ns^2$ ,  $np^5$  и  $np^6$  ( $n=5,6$ ) и простейшего иона —  $He^+$ , интересных с точки зрения современных приложений атомной спектроскопии. Диаграммы дают наглядное представление о характере распределения возбужденных состояний по основным электронным конфигурациям атомов и содержат информацию о наиболее интенсивных переходах в их оптических спектрах.

При построении диаграмм Гротриана мы исключили из рассмотрения слишком высокие ридберговские уровни энергии и автоионизационные состояния, отвечающие двухэлектронному возбуждению и лежащие выше ионизационного предела атома. Положение атомных уровней энергии (под ними подразумевалось обычно положение центров тяжести мультиплетов  $\bar{T} = \sum T_i g_i / \sum g_i$ , где  $T_i$  — компонента мультиплета,  $g_i$  — статистический вес  $i$ -го подуровня) определяется по шкале ординат в обратных сантиметрах, кроме того, цифры над горизонтальными линиями уровней обозначают соответствующее значение энергии возбуждения в электрон-вольтах ( $1 \text{ эВ} = 8065,54 \text{ см}^{-1}$ ).

Рядом с линиями уровней в прямоугольной рамке приведены значения энергии расщепления мультиплетных уровней с нужным знаком, характеризующим либо нормальный (+), либо обращенный (—) мультиплет. Штриховые метки использовались для обозначения электронных конфигураций, отвечающих разным исходным состояниям атомного остова. В случае атомов инертного газа и атома нода, у которых возбужденные состояния классифицируются по схеме  $jl$ -связи моментов, на диаграммах Гротриана были указаны только положения нижней и верхней компоненты мультиплетных подуровней (отмеченных соответственно чертой снизу и сверху при символе квантового числа  $J$  полного момента атома) и граничные длины волн переходов между заданными мультиплетными уровнями.

В некоторых случаях рядом с числовым значением длины волны перехода  $\lambda$  (в ед.  $10^{-10} \text{ м}$ ) приведены в круглых скобках значения соответствующей силы осцилляторов в поглощении  $f_{ik}$ . С помощью нижнего индекса у  $\lambda$  и  $f_{ik}$  отмечалось значение квантового числа  $J$  полного электронного момента состояния (нижнего, верхнего или обоих вместе), обладающего мультиплетной структурой.

При построении комбинированных диаграмм атомных уровней энергии и спектров на рис. 32.1—32.43 были использованы специальные руководства по диаграм-

Таблица 32.2. Поправка  $\Delta\lambda$ ,  $10^{-10} \text{ м}$ , к длине волны  $\lambda$ ,  $10^{-10} \text{ м}$ , учитывающая дисперсию света в воздухе:  $\lambda_{\text{возд}} = \lambda_{\text{вак}} - \Delta\lambda$ ;  $\lambda_{\text{вак}} = \lambda_{\text{возд}} + \Delta\lambda$

| $\lambda$ | $\Delta\lambda$ | $\lambda$ | $\Delta\lambda$ | $\lambda$ | $\Delta\lambda$ |
|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
| 2000      | 0,648           | 3400      | 0,976           | 4800      | 1,34            |
| 2100      | 0,667           | 3500      | 1,00            | 4900      | 1,37            |
| 2200      | 0,687           | 3600      | 1,03            | 5000      | 1,39            |
| 2300      | 0,708           | 3700      | 1,05            | 5200      | 1,45            |
| 2400      | 0,731           | 3800      | 1,08            | 5400      | 1,50            |
| 2500      | 0,754           | 3900      | 1,10            | 5600      | 1,55            |
| 2600      | 0,777           | 4000      | 1,13            | 5800      | 1,61            |
| 2700      | 0,801           | 4100      | 1,16            | 6000      | 1,66            |
| 2800      | 0,825           | 4200      | 1,18            | 6200      | 1,72            |
| 2900      | 0,850           | 4300      | 1,21            | 6400      | 1,77            |
| 3000      | 0,875           | 4400      | 1,24            | 6600      | 1,82            |
| 3100      | 0,900           | 4500      | 1,26            | 6800      | 1,88            |
| 3200      | 0,925           | 4600      | 1,29            | 7000      | 1,93            |
| 3300      | 0,950           | 4700      | 1,32            | 7200      | 1,98            |

| $\lambda$ | $\Delta\lambda$ | $\lambda$ | $\Delta\lambda$ | $\lambda$ | $\Delta\lambda$ |
|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
| 7400      | 2,04            | 10 600    | 2,90            | 13 800    | 3,77            |
| 7600      | 2,09            | 10 800    | 2,96            | 14 000    | 3,83            |
| 7800      | 2,15            | 11 000    | 3,01            | 14 200    | 3,88            |
| 8000      | 2,20            | 11 200    | 3,07            | 14 400    | 3,94            |
| 8200      | 2,25            | 11 400    | 3,12            | 14 600    | 3,99            |
| 8400      | 2,31            | 11 600    | 3,18            | 14 800    | 4,05            |
| 8600      | 2,36            | 11 800    | 3,23            | 15 000    | 4,10            |
| 8800      | 2,42            | 12 000    | 3,28            | 16 000    | 4,37            |
| 9000      | 2,47            | 12 200    | 3,34            | 17 000    | 4,64            |
| 9200      | 2,52            | 12 400    | 3,39            | 18 000    | 4,92            |
| 9400      | 2,58            | 12 600    | 3,45            | 19 000    | 5,19            |
| 9600      | 2,63            | 12 800    | 3,50            | 20 000    | 5,46            |
| 9800      | 2,69            | 13 000    | 3,56            | 30 000    | 8,18            |
| 10 000    | 2,74            | 13 200    | 3,61            | 40 000    | 10,9            |
| 10 200    | 2,80            | 13 400    | 3,66            | 50 000    | 13,6            |
| 10 400    | 2,85            | 13 600    | 3,72            | 100 000   | 27,3            |

мам Гротриана [1, 2], многочисленные журнальные публикации по спектрам отдельных элементов [3], таблицы спектральных линий [4, 5] и справочные издания по вероятностям оптических переходов (см. литературу в [3]). Погрешности в определении величин  $T$ ,  $\Delta T_{ii'}$ ,  $\lambda$  и  $f_{ik}$  были учтены при округлении значащих цифр в пределах  $\pm 1$  для последней приведенной цифры.

Стоит напомнить, что согласно принятому в спектроскопии соглашению все длины волн переходов с  $\lambda > 200 \text{ нм}$  относят к переходам в воздухе, а более короткие длины волн — к переходам в вакууме. В табл. 32.2 приведены значения поправки  $\Delta\lambda$  к длине волны, учитывающей дисперсию света в воздухе по стандартной формуле Эдлена [3]:

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{вак}} - \lambda_{\text{возд}} = \lambda_{\text{вак}} (1 - n^{-1}),$$

$$n = 1 + 10^{-8} \left( 8342,13 + \frac{2,406030 \cdot 10^{-2}}{1,3 \cdot 10^{-6} - \sigma^2} + \frac{1,5997 \cdot 10^{-4}}{0,389 \cdot 10^{-6} - \sigma^2} \right),$$

здесь  $n$  — показатель преломления воздуха для рассматриваемой волны;  $\sigma$  — волновое число в вакууме, равное энергии перехода  $\Delta T/h$ ,  $\text{см}^{-1}$ . В практических единицах связь между длиной волны перехода и энергией перехода имеет вид

$$\lambda_{\text{вак}} = 10^8 / \Delta T_1 = 12398,5 / \Delta T_2,$$

где  $\lambda$  выражено в  $10^{-10} \text{ м}$ ,  $\Delta T_1$  — в  $\text{см}^{-1}$  и  $\Delta T_2$  — в эВ.

### 32.3. ТОНКАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Хорошо известно, что систематика уровней энергии и спектров многоэлектронных атомов строится на основе учета в модели самосогласованного (эффективного центрально-симметричного) поля атома дополнительных возмущений от нецентрального электростатического и релятивистских (спин-орбитального и спин-спинового) взаимодействий электронов. В нерелятивистском приближении при учете только электростатических взаимодействий энергетические уровни атома характеризуются значениями полного орбитального ( $L$ ) и спинового ( $S$ ) моментов электронов и вырожде-

ны по возможным направлениям векторов  $L$  и  $S$  в пространстве.

Если учесть зависящие от спинов электронов релятивистские взаимодействия, то, строго говоря, уровни энергии атома должны характеризоваться лишь значениями сохраняющегося полного электронного момента  $J=L+S$ , поскольку каждый из моментов  $L$  и  $S$  в отдельности не сохраняется. При относительной малости релятивистских эффектов по сравнению с электростатическим взаимодействием электронов их можно рассматривать по теории возмущений и тогда уровень энергии с заданными значениями  $LS$  расщепляется на ряд компонент, отличающихся значениями квантового числа  $J(|L-S| \leq J \leq L+S)$ . Так возникает тонкая структура уровней — каждый уровень характеризуется набором квантовых чисел  $LSJ$ .

Если принять во внимание взаимодействие орбитальных и спиновых моментов электронов, то интервалы между соседними компонентами расщепленного уровня, которым отвечают значения полного электронного момента  $J$  и  $J-1$ , можно представить в виде [6]:

$$\Delta E_J - \Delta E_{J-1} = AJ,$$

где  $A$  — постоянная спин-орбитального взаимодействия, зависящая от электронной конфигурации и от  $L$  и  $S$ . Этой формулой выражается правило интервалов Ланде в приближении  $LS$ -связи моментов, когда интервалы тонкой структуры малы по сравнению с разностями энергий уровней с различными  $L$ ,  $S$ . Постоянная  $A$  может быть как положительной, так и отрицательной, и в соответствии с этим заданный мультиплет называют либо нормальным (его нижней компоненте отвечает минимальное значение  $J=|L-S|$ ), либо обращенным (нижней компоненте отвечает максимальное значение  $J=L+S$ ).

Измеренные значения энергии расщепления  $\Delta E_{J,J-1}$  соседних компонент низколежащих мультиплетов атомов приведены на рис. 32.1—32.43. Как правило, приближение  $LS$ -связи подходит для описания не слишком сильно возбужденных уровней энергии атомов из начала и середины таблицы Менделеева. Погрешности определения энергии тонкого расщепления уровней были учтены при округлении значащих цифр в пределах  $\pm 1$  для последней цифры.

## 32.4. СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Взаимодействие атомных электронов с мультипольными моментами ядра (магнитными и электрическими) приводит к расщеплению уровней энергии, ха-

рактеризуемых полным электронным моментом  $J$ , на ряд сверхтонких компонент. Каждая такая компонента определяется набором из четырех квантовых чисел  $J, I, F, m_F$ , где  $I$  — спин ядра,  $F=J+I$  — полный угловой момент атома ( $|J-I| \leq F \leq J+I$ ),  $m_F$  — проекция полного момента на выделенное направление в пространстве.

Основную роль в сверхтонком расщеплении уровней играет взаимодействие электронов с мультипольными моментами ядра наименьших порядков — магнитным дипольным и электрическим квадрупольным моментами. В первом приближении моменты  $J$  и  $I$  можно считать сохраняющимися и тогда полная энергия уровня записывается в виде суммы [7]:

$$E_F = E_J + E_{M1} + E_{E2} = E_J + \frac{h}{2} AK + \frac{3h}{8} B \frac{K(K+1) - \frac{4}{3} I(I+1)J(J+1)}{I(2I-1)J(2J-1)}; I, J \geq 1,$$

где  $E_J$  — энергия уровня без учета взаимодействия электронов с ядерными моментами;  $E_{M1}$  — энергия взаимодействия электронов с магнитным дипольным моментом ядра;  $E_{E2}$  — энергия взаимодействия электронов с электрическим квадрупольным моментом ядра. Далее, величина  $K=F(F+1)-I(I+1)-J(J+1)$  и, наконец,  $A, B$  — параметры сверхтонкого расщепления уровней, причем магнитное взаимодействие всегда превышает квадрупольное. Для состояний с электронным моментом  $J \leq 1/2$  (вследствие сферической симметрии в распределении электронного заряда) константа квадрупольного взаимодействия  $B$  обращается в нуль.

Сверхтонкое расщепление уровней принято обозначать в виде  $\Delta\nu(F, F') = \Delta E_{FF'} / h$ , где  $\Delta E_{FF'}$  — расстояние между соседними компонентами с полными моментами  $F$  и  $F'=F-1$ , измеренное в отсутствие внешнего магнитного поля. Зависимость величины  $\Delta\nu$  от параметров сверхтонкого расщепления  $A$  и  $B$  имеет вид

$$\Delta\nu(F, F') = AF + \frac{3BF(F^2 + 1/2)}{I(2I-1)J(2J-1)}; I, J \geq 1.$$

В табл. 32.3 представлены измеренные значения энергии сверхтонкого расщепления  $\Delta\nu(F, F')$ , а также значения параметров  $A, B$  для ряда слабовозбужденных уровней атомов [3, 7—9]. Погрешности в определении искомых величин сверхтонкого расщепления уровней были учтены нами при округлении значащих цифр в пределах  $\pm 1$  для последней приведенной цифры.

Таблица 32.3. Сверхтонкое расщепление низколежащих уровней атомов

| Атомный номер $Z$ | Изотоп, терм основного состояния, спин ядра $I$ | Терм         | Квантовые числа полного момента $(F, F')$ | Сверхтонкое расщепление уровней   |                                          |
|-------------------|-------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
|                   |                                                 |              |                                           | $\Delta\nu(F, F')$ , $A, B$ , МГц | $\Delta E(F, F')$ , $10^{-8}$ см $^{-1}$ |
| 1                 | $^1\text{H}$ ( $^2S_{1/2}$ ), 1/2               | $1^2S_{1/2}$ | (1,0)                                     | 1420,40575                        | 47,3796                                  |
|                   |                                                 | $2^2S_{1/2}$ | (1,0)                                     | 177,5568                          | 5,92266                                  |
|                   | $^2\text{H}$ ( $^2S_{1/2}$ ), 1                 | $1^2S_{1/2}$ | (3/2, 1/2)                                | 327,38435                         | 10,9204                                  |
|                   |                                                 | $2^2S_{1/2}$ | (3/2, 1/2)                                | 40,9244                           | 1,36509                                  |
|                   | $^3\text{H}$ ( $^2S_{1/2}$ ), 1/2               | $1^2S_{1/2}$ | (1,0)                                     | 1516,70147                        | 50,5917                                  |
|                   |                                                 |              |                                           |                                   |                                          |

| Атомный номер $Z$ | Изотоп, терм. основного состояния, спин ядра $I$ | Терм.        | Квантовые числа полного момента ( $F, F'$ ) | Сверхтонкое расщепление уровней      |                                            |
|-------------------|--------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
|                   |                                                  |              |                                             | $\Delta\nu(F, F'), A, B, \text{МГц}$ | $\Delta E(F, F'), 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ |
| 2                 | $^3\text{He}(^1S_0), 1/2$                        | $2^3S_1$     | (3/2, 1/2)                                  | 6739,701                             | 224,812                                    |
|                   |                                                  | $2^3P_2$     | (5/2, 3/2)                                  | 6960                                 | 232,2                                      |
|                   |                                                  | $2^3P_1$     | (3/2, 1/2)                                  | 4510                                 | 151                                        |
| 3                 | $^3\text{He}^+(^2S_{1/2}), 1/2$                  | $1^2S_{1/2}$ | (1,0)                                       | 8665,6499                            | 289,055                                    |
|                   |                                                  | $2^2S_{1/2}$ | (3/2, 1/2)                                  | 228,20526                            | 7,61211                                    |
|                   |                                                  | $2^2P_{1/2}$ | —                                           | $A = 17,37$                          | —                                          |
|                   | $^6\text{Li}(^2S_{1/2}), 1$                      | $2^2P_{3/2}$ | —                                           | $A = -1,16$                          | —                                          |
|                   |                                                  | $2^2S_{1/2}$ | (2,1)                                       | $B = -0,1$                           | —                                          |
|                   |                                                  | $2^2P_{1/2}$ | —                                           | $A = 45,9$                           | —                                          |
| 4                 | $^7\text{Li}(^2S_{1/2}), 3/2$                    | $2^2P_{3/2}$ | —                                           | $A = -3,06$                          | —                                          |
|                   |                                                  | $2^2S_{1/2}$ | (2,1)                                       | $B = -0,2$                           | —                                          |
|                   |                                                  | $2^2P_{1/2}$ | —                                           | $A = 45,9$                           | —                                          |
|                   | $^9\text{Be}(^1S_0), 3/2$                        | $2^3P_1$     | (5/2, 3/2)                                  | 354,44                               | 11,823                                     |
|                   |                                                  | $2^3P_2$     | (3/2, 1/2)                                  | 202,95                               | 6,7697                                     |
|                   |                                                  | $2^3P_2$     | (7/2, 5/2)                                  | 435,48                               | 14,526                                     |
| 5                 | $^{10}\text{B}(^2P_{1/2}), 3$                    | $2^2P_{1/2}$ | (5/2, 3/2)                                  | 312,02                               | 10,408                                     |
|                   |                                                  | $2^2P_{1/2}$ | (3/2, 1/2)                                  | 187,62                               | 6,2583                                     |
|                   |                                                  | $2^2P_{3/2}$ | (7/2, 5/2)                                  | 429,05                               | 14,312                                     |
|                   | $^{11}\text{B}(^2P_{1/2}), 3/2$                  | $2^2P_{1/2}$ | (2,1)                                       | 732,15                               | 24,422                                     |
|                   |                                                  | $2^2P_{3/2}$ | (3,2)                                       | 222,7                                | 7,428                                      |
|                   |                                                  | $2^2S_{1/2}$ | (2,1)                                       | 144,0                                | 4,803                                      |
| 6                 | $^{13}\text{C}(^3P_0), 1/2$                      | $2^3P_1$     | (1,0)                                       | 71                                   | 2,37                                       |
|                   |                                                  | $2^3P_2$     | (3/2, 1/2)                                  | 4,3                                  | 0,14                                       |
|                   |                                                  | $2^3S_{3/2}$ | (5/2, 3/2)                                  | 372,6                                | 12,43                                      |
| 7                 | $^{14}\text{N}(^4S_{3/2}), 1$                    | $2^4S_{3/2}$ | —                                           | $A = 10,45093$                       | —                                          |
| 8                 | $^{17}\text{O}(^3P_2), 5/2$                      | $2^3P_2$     | —                                           | $B = 1,3$                            | —                                          |
|                   |                                                  | $2^3P_1$     | —                                           | $A = -219,6$                         | —                                          |
|                   |                                                  | $2^3P_1$     | —                                           | $A = 4,7$                            | —                                          |
| 9                 | $^{19}\text{F}(^2P_{3/2}), 1/2$                  | $2^2P_{3/2}$ | (2,1)                                       | 4020                                 | 134                                        |
| 10                | $^{21}\text{Ne}(^1S_0), 3/2$                     | $2^2P_{1/2}$ | (1,0)                                       | 10250                                | 342                                        |
|                   |                                                  | $3^3P_2$     | (7/2, 5/2)                                  | 1034,5                               | 34,51                                      |
|                   |                                                  | $3^3P_2$     | (5/2, 3/2)                                  | 599,4                                | 19,99                                      |
| 11                | $^{23}\text{Na}(^2S_{1/2}), 3/2$                 | $3^3P_2$     | (3/2, 1/2)                                  | 303,9                                | 10,14                                      |
|                   |                                                  | $3^2S_{1/2}$ | (2,1)                                       | 1771,62613                           | 59,09513                                   |
|                   |                                                  | $3^6P_{1/2}$ | —                                           | $A = 94,3$                           | —                                          |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | —                                           | $A = 18,7$                           | —                                          |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | —                                           | $B = 2,9$                            | —                                          |
|                   |                                                  | $3^3P_1$     | (7/2, 5/2)                                  | 516,1                                | 17,22                                      |
| 12                | $^{25}\text{Mg}(^1S_0), 5/2$                     | $3^3P_1$     | (5/2, 3/2)                                  | 350,0                                | 11,7                                       |
|                   |                                                  | $3^3P_2$     | (9/2, 7/2)                                  | 567,3                                | 18,92                                      |
|                   |                                                  | $3^3P_2$     | (7/2, 5/2)                                  | 452,3                                | 15,09                                      |
|                   |                                                  | $3^3P_2$     | (5/2, 3/2)                                  | 329,0                                | 10,97                                      |
|                   |                                                  | $3^3P_2$     | (3/2, 1/2)                                  | 199,8                                | 6,66                                       |
|                   |                                                  | $3^2P_{1/2}$ | (3,2)                                       | 1506,1                               | 50,24                                      |
| 13                | $^{27}\text{Al}(^2P_{1/2}), 5/2$                 | $3^2P_{3/2}$ | (4,3)                                       | 392                                  | 13,1                                       |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | (3,2)                                       | 274                                  | 9,14                                       |
|                   |                                                  | $4^2S_{1/2}$ | —                                           | $A = 420$                            | —                                          |
|                   |                                                  | $3^4S_{3/2}$ | —                                           | $A = 55,06$                          | —                                          |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | (3,2)                                       | 670,0135                             | 22,349                                     |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | (2,1)                                       | 355,2210                             | 11,849                                     |
| 15                | $^{31}\text{P}(^4S_{3/2}), 1/2$                  | $3^4S_{3/2}$ | (1,0)                                       | 150,1736                             | 5,009                                      |
| 17                | $^{35}\text{Cl}(^2P_{3/2}), 3/2$                 | $3^2P_{1/2}$ | (2,1)                                       | 2074,38                              | 69,19                                      |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | (3,2)                                       | 555,3043                             | 18,523                                     |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | (2,1)                                       | 298,1277                             | 9,944                                      |
|                   |                                                  | $3^2P_{3/2}$ | (1,0)                                       | 127,4408                             | 4,251                                      |
|                   |                                                  | $3^2P_{1/2}$ | (2,1)                                       | 1726,7                               | 57,60                                      |
|                   |                                                  | $3^2P_{1/2}$ | (2,1)                                       | 1726,7                               | 57,60                                      |

| Атомный номер Z | Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I | Терм         | Квантовые числа полного момента (F, F') | Сверхтонкое расщепление уровней   |                                             |
|-----------------|-----------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|
|                 |                                               |              |                                         | $\Delta\nu(F, F')$ ,<br>A, B, МГц | $\Delta E(F, F')$ ,<br>$10^{-2}$ см $^{-1}$ |
| 19              | $^{39}\text{K} (^2S_{1/2}), 3/2$              | $4^2S_{1/2}$ | (2, 1)                                  | 461,71972                         | 15,40132                                    |
|                 |                                               | $4^2P_{1/2}$ | —                                       | A=27,8                            | —                                           |
|                 |                                               | $4^2P_{3/2}$ | —                                       | A=6,1                             | —                                           |
|                 | $^{40}\text{K} (^2S_{1/2}), 4$                | $4^2S_{1/2}$ | —                                       | B=2,8                             | —                                           |
|                 |                                               | $4^2P_{1/2}$ | —                                       | A=-285,73                         | —                                           |
|                 |                                               | $4^2P_{3/2}$ | —                                       | A=-34,5                           | —                                           |
|                 | $^{41}\text{K} (^2S_{1/2}), 3/2$              | $4^2S_{1/2}$ | (2, 1)                                  | A=-7,5                            | —                                           |
|                 |                                               | $4^2P_{1/2}$ | —                                       | B=-3                              | —                                           |
|                 |                                               | $4^2P_{3/2}$ | —                                       | 254,01387                         | 8,47300                                     |
|                 | $^{41}\text{Ca} (1S_0), 7/2$                  | $4^3P_1$     | —                                       | A=15,2                            | —                                           |
|                 |                                               | $4^3P_1$     | —                                       | A=3,4                             | —                                           |
|                 |                                               | $4^3P_1$     | —                                       | B=3,3                             | —                                           |
| 20              | $^{43}\text{Ca} (1S_0), 7/2$                  | $4^3P_1$     | —                                       | A=-240,7                          | —                                           |
|                 |                                               | $4^3P_1$     | —                                       | B=4                               | —                                           |
|                 |                                               | $4^3P_1$     | —                                       | A=-198,8                          | —                                           |
|                 | $^{45}\text{Sc} (2D_{3/2}), 7/2$              | $3^2D_{3/2}$ | (5, 4)                                  | B=3                               | —                                           |
|                 |                                               | $3^2D_{5/2}$ | (4, 3)                                  | 1329                              | 44,3                                        |
|                 |                                               | $3^2D_{5/2}$ | (6, 5)                                  | 1085,8                            | 36,22                                       |
|                 | $^{45}\text{Sc} (2D_{3/2}), 7/2$              | $4^4F_{3/2}$ | (5, 4)                                  | 635,0                             | 21,18                                       |
|                 |                                               | $4^4F_{5/2}$ | (4, 3)                                  | 543,8                             | 18,14                                       |
|                 |                                               | $4^4F_{7/2}$ | (4, 3)                                  | 444,7                             | 14,83                                       |
|                 | $^{47}\text{Ti} (3F_2), 5/2$                  | $3^3F_2$     | —                                       | A=158,5                           | —                                           |
|                 |                                               | $3^3F_2$     | —                                       | B=-5,2                            | —                                           |
|                 |                                               | $3^3F_2$     | —                                       | A=154,0                           | —                                           |
| 21              | $^{49}\text{Ti} (3F_2), 7/2$                  | $3^3F_2$     | —                                       | B=-6,5                            | —                                           |
|                 |                                               | $3^3F_2$     | —                                       | A=250,0                           | —                                           |
|                 |                                               | $3^3F_2$     | —                                       | B=-9,1                            | —                                           |
|                 | $^{51}\text{V} (4F_{3/2}), 7/2$               | $3^4F_{3/2}$ | —                                       | A=286,0                           | —                                           |
|                 |                                               | $3^4F_{5/2}$ | —                                       | B=-15                             | —                                           |
|                 |                                               | $3^4F_{7/2}$ | —                                       | A=-85,703                         | —                                           |
|                 | $^{51}\text{V} (4F_{3/2}), 7/2$               | $3^4F_{3/2}$ | —                                       | B=25,70                           | —                                           |
|                 |                                               | $3^4F_{5/2}$ | —                                       | A=-85,726                         | —                                           |
|                 |                                               | $3^4F_{7/2}$ | —                                       | B=21,07                           | —                                           |
|                 | $^{53}\text{Cr} (7S_3), 3/2$                  | $3^6D_{1/2}$ | —                                       | A=560,07                          | —                                           |
|                 |                                               | $3^6D_{3/2}$ | —                                       | B=3,98                            | —                                           |
|                 |                                               | $3^6D_{5/2}$ | —                                       | A=751,53                          | —                                           |
| 22              | $^{55}\text{Mn} (6S_{5/2}), 5/2$              | $3^6D_{3/2}$ | —                                       | A=405,64                          | —                                           |
|                 |                                               | $3^6D_{5/2}$ | —                                       | B=-7,0                            | —                                           |
|                 |                                               | $3^6D_{7/2}$ | —                                       | A=373,53                          | —                                           |
|                 | $^{55}\text{Mn} (6S_{5/2}), 5/2$              | $3^6D_{1/2}$ | —                                       | B=-5,0                            | —                                           |
|                 |                                               | $3^6D_{3/2}$ | —                                       | A=382,37                          | —                                           |
|                 |                                               | $3^6D_{5/2}$ | —                                       | B=2,3                             | —                                           |
|                 | $^{57}\text{Fe} (5D_4), 1/2$                  | $3^6D_{1/2}$ | (9/2, 7/2)                              | 371,7                             | 12,40                                       |
|                 |                                               | $3^6D_{3/2}$ | (7/2, 5/2)                              | 289,09                            | 9,643                                       |
|                 |                                               | $3^6D_{5/2}$ | (5/2, 3/2)                              | 206,50                            | 6,888                                       |
|                 | $^{57}\text{Fe} (5D_4), 1/2$                  | $4^6D_{9/2}$ | —                                       | A=-72,4208                        | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{7/2}$ | —                                       | B=-0,018                          | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{5/2}$ | —                                       | A=510,3                           | —                                           |
| 23              | $^{57}\text{Fe} (5D_4), 1/2$                  | $4^6D_{9/2}$ | —                                       | B=132,2                           | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{7/2}$ | —                                       | A=458,9                           | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{5/2}$ | —                                       | B=21,7                            | —                                           |
|                 | $^{57}\text{Fe} (5D_4), 1/2$                  | $4^6D_{9/2}$ | —                                       | A=436,7                           | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{7/2}$ | —                                       | B=-46,8                           | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{5/2}$ | —                                       | A=469,4                           | —                                           |
|                 | $^{57}\text{Fe} (5D_4), 1/2$                  | $4^6D_{9/2}$ | —                                       | B=-65,1                           | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{7/2}$ | —                                       | A=882,1                           | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{5/2}$ | —                                       | A=38,08                           | —                                           |
|                 | $^{57}\text{Fe} (5D_4), 1/2$                  | $4^6D_{9/2}$ | —                                       | A=87,25                           | —                                           |
|                 |                                               | $4^6D_{7/2}$ | —                                       |                                   |                                             |
|                 |                                               | $4^6D_{5/2}$ | —                                       |                                   |                                             |



| Атомный<br>номер $Z$ | Изотоп, терм основного<br>состояния, спин ядра $I$ | Терм          | Квантовые числа<br>полного момента<br>( $F, F'$ ) | Сверхтонкое расщепление уровней           |                                                 |
|----------------------|----------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                      |                                                    |               |                                                   | $\Delta\nu(F, F'),$<br>$A, B, \text{МГц}$ | $\Delta E(F, F'),$<br>$10^{-3} \text{ см}^{-1}$ |
| 27                   | $^{59}\text{Co} (^4F_{9/2}), 7/2$                  | $4^5F_4$      | —                                                 | $A = 78,43$                               | —                                               |
|                      |                                                    | $4^5F_3$      | —                                                 | $A = 69,63$                               | —                                               |
|                      |                                                    | $4^5F_2$      | —                                                 | $A = 55,99$                               | —                                               |
|                      |                                                    | $3^4F_{9/2}$  | (8,7)                                             | 3655                                      | 121,9                                           |
|                      |                                                    |               | (7,6)                                             | 3169,4                                    | 105,7                                           |
| 28                   | $^{61}\text{Ni} (^3F_4), 3/2$                      | $3^3F_4$      | (6,5)                                             | 2695                                      | 89,9                                            |
|                      |                                                    |               | (5,4)                                             | 2230,6                                    | 74,40                                           |
| 29                   | $^{63}\text{Cu} (^2S_{1/2}), 3/2$                  | $4^2S_{1/2}$  | (4,3)                                             | 1774,5                                    | 59,19                                           |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -215,04$                             | —                                               |
| 30                   | $^{65}\text{Cu} (^2S_{1/2}), 3/2$                  | $4^2S_{1/2}$  | —                                                 | $B = -56,9$                               | —                                               |
|                      |                                                    |               | (2,1)                                             | 11733,8174                                | 391,398                                         |
| 31                   | $^{67}\text{Zn} (^1S_0), 5/2$                      | $4^3P_2$      | (2,1)                                             | 12568,780                                 | 419,250                                         |
|                      |                                                    |               | (9/2, 7/2)                                        | 2418,1                                    | 80,66                                           |
|                      |                                                    |               | (7/2, 5/2)                                        | 1855,7                                    | 61,90                                           |
|                      |                                                    |               | (5/2, 3/2)                                        | 1312,1                                    | 43,77                                           |
|                      |                                                    |               | (3/2, 1/2)                                        | 781,9                                     | 26,08                                           |
| 32                   | $^{69}\text{Ga} (^2P_{1/2}), 3/2$                  | $4^2P_{1/2}$  | (2,1)                                             | 2677,987                                  | 89,328                                          |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 190,794$                             | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $B = 62,522$                              | —                                               |
|                      |                                                    |               | (2,1)                                             | 2140                                      | 71,3                                            |
|                      |                                                    |               | (2,1)                                             | 3402,69                                   | 113,50                                          |
| 33                   | $^{71}\text{Ga} (^2P_{1/2}), 3/2$                  | $4^2P_{1/2}$  | (3,2)                                             | 766,696                                   | 25,574                                          |
|                      |                                                    |               | (2,1)                                             | 445,470                                   | 14,859                                          |
|                      |                                                    |               | (1,0)                                             | 203,043                                   | 6,773                                           |
|                      |                                                    |               | (2,1)                                             | 2720                                      | 90,6                                            |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 15,55$                               | —                                               |
| 36                   | $^{73}\text{Ge} (^3P_0), 9/2$                      | $4^3P_1$      | —                                                 | $B = -54,57$                              | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -64,427$                             | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $B = 111,8$                               | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -66,20$                              | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $B = -0,53$                               | —                                               |
| 37                   | $^{75}\text{As} (^4S_{3/2}), 3/2$                  | $4^4S_{3/2}$  | (3,2)                                             | 819,45                                    | 27,33                                           |
|                      |                                                    |               | (2,1)                                             | 595,12                                    | 19,85                                           |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -143,0$                              | —                                               |
|                      |                                                    |               | (3,2)                                             | 3035,732                                  | 101,261                                         |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 120,7$                               | —                                               |
| 39                   | $^{83}\text{Kr} (^1S_0), 9/2$                      | $5p [^1/2]_1$ | —                                                 | $A = 25,0$                                | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $B = 26,0$                                | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -5$                                  | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 7$                                   | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 239$                                 | —                                               |
| 42                   | $^{85}\text{Rb} (^2S_{1/2}), 5/2$                  | $5^2S_{1/2}$  | (2,1)                                             | 6834,6826                                 | 227,98                                          |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 406$                                 | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 84,9$                                | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $B = 12,6$                                | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -17$                                 | —                                               |
| 47                   | $^{87}\text{Rb} (^2S_{1/2}), 3/2$                  | $4^2D_{5/2}$  | —                                                 | $A = 25$                                  | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 810$                                 | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -57,2$                               | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -28,8$                               | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -208,5828$                           | —                                               |
| 49                   | $^{89}\text{Y} (^2D_{3/2}), 1/2$                   | $5^2P_{1/2}$  | —                                                 | $B = 0,0087$                              | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 428,84$                              | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $B = 0,028$                               | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = -212,9817$                           | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 | $A = 437,89$                              | —                                               |
| 51                   | $^{91}\text{Mo} (^7S_3), 5/2$                      | $5^5S_2$      | —                                                 | $A = -32$                                 | —                                               |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
| 53                   | $^{93}\text{Mo} (^7S_3), 5/2$                      | $5^5S_2$      | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
| 55                   | $^{95}\text{Mo} (^7S_3), 5/2$                      | $5^5S_2$      | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
| 57                   | $^{97}\text{Mo} (^7S_3), 5/2$                      | $5^5S_2$      | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
| 59                   | $^{99}\text{Tc} (^6S_5), 3/2$                      | $5^5S_2$      | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
| 61                   | $^{101}\text{Ag} (^2S_{1/2}), 1/2$                 | $5^2P_{3/2}$  | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |
|                      |                                                    |               | —                                                 |                                           |                                                 |

| Атомный номер Z | Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I                  | Терм         | Квантовые числа полного момента (F, F') | Сверхтонкое расщепление уровней   |                                             |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|
|                 |                                                                |              |                                         | $\Delta\nu$ (F, F'),<br>А. В. МГц | $\Delta E$ (F, F'),<br>$10^{-8}$ см $^{-1}$ |
| 49              | $^{113}\text{In}(^2P_{1/2}), 9/2$                              | $5^2P_{1/2}$ | (5,4)                                   | 11 385                            | 379,8                                       |
|                 |                                                                | $6^2S_{1/2}$ | (5,4)                                   | 8410                              | 281                                         |
|                 | $^{115}\text{In}(^2P_{1/2}), 9/2$                              | $5^2P_{1/2}$ | —                                       | A = 2281,955                      | —                                           |
|                 |                                                                | $5^2P_{3/2}$ | —                                       | A = 242,165                       | —                                           |
|                 |                                                                | $6^2S_{1/2}$ | (5,4)                                   | 8430                              | 281                                         |
| 51              | $^{123}\text{Sb}(^4S_{3/2}), 7/2$                              | $5^4S_{3/2}$ | (5,4)                                   | 815,6                             | 27,20                                       |
|                 |                                                                |              | (4,3)                                   | 648,5                             | 21,63                                       |
|                 |                                                                |              | (3,2)                                   | 484,0                             | 16,1                                        |
| 52              | $^{125}\text{Te}(^3P_2), 1/2$                                  | $5^3P_2$     | —                                       | A = -1010,3                       | —                                           |
|                 |                                                                | $5^3P_1$     | —                                       | A = 782,5                         | —                                           |
|                 |                                                                | $5^1D_2$     | —                                       | A = -2887,0                       | —                                           |
| 53              | $^{127}\text{I}(^2P_{3/2}), 5/2$                               | $5^2P_{3/2}$ | (4,3)                                   | 4226,17                           | 140,97                                      |
|                 |                                                                |              | (3,2)                                   | 1965,9                            | 65,58                                       |
|                 |                                                                |              | (2,1)                                   | 737,49                            | 24,60                                       |
| 54              | $^{129}\text{Xe}(^1S_0), 1/2$<br>$^{131}\text{Xe}(^1S_0), 3/2$ | $6^3P_2$     | (5/2, 3/2)                              | 5961,258                          | 198,85                                      |
|                 |                                                                | $6^3P_2$     | (7/2, 5/2)                              | 2693,623                          | 89,850                                      |
|                 |                                                                |              | (5/2, 3/2)                              | 1608,348                          | 53,649                                      |
| 55              | $^{133}\text{Cs}(^2S_{1/2}), 7/2$                              |              | (3/2, 1/2)                              | 838,764                           | 27,978                                      |
|                 |                                                                | $6^2S_{1/2}$ | (4,3)                                   | 9192,63177                        | 306,63342                                   |
|                 |                                                                | $6^2P_{1/2}$ | —                                       | A = 292                           | —                                           |
|                 |                                                                | $6^2P_{3/2}$ | —                                       | A = 50,3                          | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = -0,4                          | —                                           |
| 56              | $^{135}\text{Ba}(^1S_0), 3/2$                                  | $5^2D_{3/2}$ | —                                       | A = 16,3                          | —                                           |
|                 |                                                                | $5^2D_{5/2}$ | —                                       | A = -22                           | —                                           |
|                 |                                                                | $7^1S_{1/2}$ | —                                       | A = 550                           | —                                           |
|                 |                                                                | $5^3D_1$     | —                                       | A = -470                          | —                                           |
|                 |                                                                | $5^3D_2$     | —                                       | B = 12                            | —                                           |
|                 | $^{137}\text{Ba}(^1S_0), 3/2$                                  | $5^3D_3$     | —                                       | A = 371                           | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = 18                            | —                                           |
|                 |                                                                | $5^1D_2$     | —                                       | A = 408                           | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = 20                            | —                                           |
|                 |                                                                | $5^3D_1$     | —                                       | A = -73,4                         | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = 38,7                          | —                                           |
|                 |                                                                | $5^3D_2$     | —                                       | A = -520                          | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = 17                            | —                                           |
|                 |                                                                | $5^3D_3$     | —                                       | A = 414                           | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = 27                            | —                                           |
|                 |                                                                | $5^1D_2$     | —                                       | A = 455                           | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = 40                            | —                                           |
| 57              | $^{139}\text{La}(^2D_{3/2}), 7/2$                              |              |                                         | A = -82,2                         | —                                           |
|                 |                                                                |              |                                         | B = 59,6                          | —                                           |
|                 |                                                                | $5^2D_{3/2}$ | (5,4)                                   | 737,97                            | 24,62                                       |
|                 |                                                                |              | (4,3)                                   | 551,98                            | 18,41                                       |
|                 |                                                                |              | (3,2)                                   | 391,6                             | 13,06                                       |
|                 |                                                                | $5^2D_{5/2}$ | (6,5)                                   | 1120,90                           | 37,39                                       |
|                 |                                                                |              | (5,4)                                   | 912,79                            | 30,45                                       |
|                 |                                                                |              | (4,3)                                   | 716,29                            | 23,89                                       |
|                 |                                                                |              | (3,2)                                   | 529,1                             | 17,65                                       |
|                 |                                                                | $6^4F_{3/2}$ | (5,4)                                   | 2390,6                            | 79,74                                       |
|                 |                                                                |              | (4,3)                                   | 1925,5                            | 64,23                                       |
|                 |                                                                | $6^4F_{5/2}$ | (6,5)                                   | 1808,9                            | 60,34                                       |
|                 |                                                                |              | (5,4)                                   | 1503,2                            | 50,14                                       |
|                 |                                                                |              | (4,3)                                   | 1199,8                            | 40,02                                       |
|                 |                                                                | $6^4P_{1/2}$ | (4,3)                                   | 9840,6                            | 328,2                                       |
|                 |                                                                | $6^4P_{3/2}$ | (4,3)                                   | 3707,8                            | 123,68                                      |
|                 |                                                                | $6^4P_{5/2}$ | (4,3)                                   | 3216,5                            | 107,3                                       |

| Атомный номер $Z$ | Изотоп, терм основного состояния, спин ядра $I$ | Терм          | Квантовые числа полного момента ( $F, F'$ )                             | Сверхтонкое расщепление уровней             |                                                  |
|-------------------|-------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                   |                                                 |               |                                                                         | $\Delta\nu (F, F'),$<br>$A, B, \text{ МГц}$ | $\Delta E (F, F'),$<br>$10^{-3} \text{ см}^{-1}$ |
| 59                | $^{141}\text{Pr}(^4I_{9/2}), 5/2$               | $4^4I_{9/2}$  | —                                                                       | $A = 926,209$<br>$B = -11,88$               | —                                                |
|                   |                                                 | $4^4I_{11/2}$ | —                                                                       | $A = 730,393$<br>$B = -11,88$               | —                                                |
|                   |                                                 | $4^4I_{13/2}$ | —                                                                       | $A = 613,240$<br>$B = -12,85$               | —                                                |
|                   |                                                 | $4^4I_{15/2}$ | —                                                                       | $A = 541,575$<br>$B = -14,56$               | —                                                |
| 60                | $^{143}\text{Nd}(^6I_4), 7/2$                   | $4^6I_4$      | (15/2, 13/2)<br>(13/2, 11/2)<br>(11/2, 9/2)<br>(9/2, 7/2)<br>(7/2, 5/2) | 1418<br>1257,5<br>1084,7<br>901,5<br>710    | 47,3<br>41,95<br>36,18<br>30,07<br>23,7          |
|                   |                                                 | $4^6I_5$      | —                                                                       | $A = -153,68$<br>$B = 115,7$                | —                                                |
|                   |                                                 | $4^6I_6$      | —                                                                       | $A = -121,63$<br>$B = 64,6$                 | —                                                |
|                   | $^{145}\text{Nd}(^6I_4), 7/2$                   | $4^6I_4$      | —                                                                       | $A = -95,53$<br>$B = 61,0$                  | —                                                |
|                   |                                                 | $4^6I_5$      | —                                                                       | $A = -33,494$<br>$B = -58,692$              | —                                                |
|                   |                                                 | $4^6I_6$      | —                                                                       | $A = -41,184$<br>$B = -62,23$               | —                                                |
| 62                | $^{147}\text{Sm}(^7F_0), 7/2$                   | $4^7F_1$      | —                                                                       | $A = -50,240$<br>$B = -33,68$               | —                                                |
|                   |                                                 | $4^7F_2$      | —                                                                       | $A = -27,611$<br>$B = 16,962$               | —                                                |
|                   |                                                 | $4^7F_3$      | —                                                                       | $A = -33,951$<br>$B = 17,99$                | —                                                |
|                   | $^{149}\text{Sm}(^7F_0), 7/2$                   | $4^7F_1$      | —                                                                       | $A = -41,418$<br>$B = 9,75$                 | —                                                |
|                   |                                                 | $4^7F_2$      | —                                                                       |                                             |                                                  |
|                   |                                                 | $4^7F_3$      | —                                                                       |                                             |                                                  |
| 63                | $^{151}\text{Eu}(^8S_{7/2}), 5/2$               | $4^8S_{7/2}$  | (6,5)<br>(5,4)<br>(4,3)                                                 | 120,67<br>100,29<br>80,05                   | 4,025<br>3,345<br>2,67                           |
|                   |                                                 | $4^8S_{7/2}$  | (6,5)<br>(5,4)<br>(4,3)                                                 | 54,04<br>44,00<br>35,00                     | 1,803<br>1,47<br>1,17                            |
|                   | $^{153}\text{Eu}(^8S_{7/2}), 5/2$               | $4^8S_{7/2}$  | (6,5)<br>(5,4)<br>(4,3)                                                 |                                             |                                                  |
|                   |                                                 | $4^8S_{7/2}$  |                                                                         |                                             |                                                  |
| 64                | $^{155}\text{Gd}(^9D_2), 3/2$                   | $5^9D_2$      | —                                                                       | $A = 36,575$<br>$B = 179,4$                 | —                                                |
|                   |                                                 | $5^9D_3$      | —                                                                       | $A = 4,92$<br>$B = -406,67$                 | —                                                |
|                   |                                                 | $5^9D_4$      | —                                                                       | $A = -6,86$<br>$B = -352,8$                 | —                                                |
|                   | $^{157}\text{Gd}(^9D_2), 3/2$                   | $5^9D_2$      | —                                                                       | $A = 47,96$<br>$B = 191,2$                  | —                                                |
|                   |                                                 | $5^9D_3$      | —                                                                       | $A = 6,45$<br>$B = -433,2$                  | —                                                |
|                   |                                                 | $5^9D_4$      | —                                                                       | $A = -9,00$<br>$B = -375,9$                 | —                                                |
| 65                | $^{159}\text{Tb}(^6H_{15/2}), 3/2$              | $4^6H_{15/2}$ | —                                                                       | $A = 673,75$<br>$B = 1449,3$                | —                                                |
|                   |                                                 | $4^6H_{13/2}$ | —                                                                       | $A = 682,91$<br>$B = 1167,5$                | —                                                |
|                   | $^{161}\text{Tb}(^6H_{15/2}), 3/2$              | $4^6H_{15/2}$ | —                                                                       | $A = 532,20$<br>$B = 928,9$                 | —                                                |
|                   |                                                 | $4^6H_{13/2}$ | —                                                                       |                                             |                                                  |
| 66                | $^{161}\text{Dy}(^6I_8), 5/2$                   | $4^6I_8$      | —                                                                       | $A = -116,232$<br>$B = 1091,57$             | —                                                |
|                   | $^{163}\text{Dy}(^6I_8), 5/2$                   | $4^6I_8$      | —                                                                       | $A = 162,7543$<br>$B = 1152,86$             | —                                                |

| Атомный<br>номер Z | Изотоп, терм основного<br>состояния, спин ядра I         | Терм                                                   | Квантовые числа<br>полного момента<br>(F, F') | Сверхтонкое расщепление уровней  |                                                          |
|--------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                    |                                                          |                                                        |                                               | $\Delta\nu$ (F, F')<br>A, B, МГц | $\Delta E$ (F, F'),<br>10 <sup>-3</sup> см <sup>-1</sup> |
| 67                 | <sup>165</sup> Ho( <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub> ), 7/2 | <sup>4</sup> I <sub>7</sub>                            | —                                             | A = 177,53                       | —                                                        |
|                    |                                                          | <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>                         | (9,8)                                         | B = 1066,4                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | (8,7)                                         | 7184,8                           | 239,7                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (7,6)                                         | 6540,8                           | 218,2                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (6,5)                                         | 5842,4                           | 194,9                                                    |
| 68                 | <sup>167</sup> Er ( <sup>3</sup> H <sub>6</sub> ), 7/2   | <sup>4</sup> H <sub>6</sub>                            | (6,5)                                         | 5096,3                           | 170,0                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (5,4)                                         | 4309,3                           | 143,7                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = -120,486                     | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = -4552,96                     | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | 1496,5507                        | 49,920                                                   |
| 69                 | <sup>169</sup> Tm( <sup>2</sup> F <sub>7/2</sub> ), 1/2  | <sup>4</sup> F <sub>7/2</sub>                          | (4,3)                                         | A = -374,13766                   | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | 2051,2201                        | 68,421                                                   |
|                    |                                                          |                                                        | (5,4)                                         | 345,497                          | 11,524                                                   |
|                    |                                                          |                                                        | (4,3)                                         | 496,578                          | 16,564                                                   |
|                    |                                                          |                                                        | (3,2)                                         | 1837,570                         | 61,295                                                   |
| 71                 | <sup>175</sup> Lu( <sup>2</sup> D <sub>3/2</sub> ), 7/2  | <sup>5</sup> D <sub>3/2</sub>                          | (6,5)                                         | 800,343                          | 26,70                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (5,4)                                         | 161,815                          | 5,398                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (4,3)                                         | 157,73                           | 5,26                                                     |
|                    |                                                          |                                                        | (3,2)                                         | 238,058                          | 7,941                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (2,1)                                         | —                                | —                                                        |
|                    |                                                          | <sup>5</sup> D <sub>5/2</sub>                          | —                                             | A = 137,9                        | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = 2131                         | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 104,0                        | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = 2624                         | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | —                                | —                                                        |
| 72                 | <sup>177</sup> Hf( <sup>3</sup> F <sub>2</sub> ), 7/2    | <sup>5</sup> F <sub>2</sub>                            | (11/2, 9/2)                                   | 991,792                          | 33,08                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (9/2, 7/2)                                    | 477,008                          | 15,91                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (7/2, 5/2)                                    | 162,887                          | 5,433                                                    |
|                    |                                                          |                                                        | (5/2, 3/2)                                    | 4,864                            | 0,16                                                     |
|                    |                                                          |                                                        | (13/2, 11/2)                                  | 82,132                           | 2,74                                                     |
|                    |                                                          | <sup>179</sup> Hf ( <sup>3</sup> F <sub>2</sub> ), 9/2 | (11/2, 9/2)                                   | 392,848                          | 13,104                                                   |
|                    |                                                          |                                                        | (9/2, 7/2)                                    | 541,9104                         | 18,076                                                   |
|                    |                                                          |                                                        | (7/2, 5/2)                                    | 558,672                          | 18,635                                                   |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 509,08                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = -1012,24                     | —                                                        |
| 73                 | <sup>181</sup> Ta( <sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> ), 7/2  | <sup>5</sup> F <sub>3/2</sub>                          | —                                             | A = 313,47                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = -834,8                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 264,41                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = -787,5                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 256,62                       | —                                                        |
|                    |                                                          | <sup>5</sup> F <sub>5/2</sub>                          | —                                             | B = -650,4                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 884,17                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 379                          | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = -1350                        | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 29,12                        | —                                                        |
| 74                 | <sup>183</sup> W( <sup>5</sup> D <sub>0</sub> ), 1/2     | —                                                      | A = 505,6                                     | —                                |                                                          |
|                    |                                                          | —                                                      | A = 56,3                                      | —                                |                                                          |
|                    |                                                          | —                                                      | A = 78,0                                      | —                                |                                                          |
|                    |                                                          | —                                                      | A = 88,3                                      | —                                |                                                          |
|                    |                                                          | —                                                      | A = -56,596                                   | —                                |                                                          |
| 75                 | <sup>185</sup> Re( <sup>6</sup> S <sub>5/2</sub> ), 5/2  | <sup>5</sup> S <sub>5/2</sub>                          | —                                             | B = 29,635                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 880,44                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = 1618,5                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = -57,149                      | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = 28,05                        | —                                                        |
|                    |                                                          | <sup>5</sup> P <sub>5/2</sub>                          | —                                             | A = 889,24                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = 1531,7                       | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | A = 2600                         | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | B = 2000                         | —                                                        |
|                    |                                                          |                                                        | —                                             | —                                | —                                                        |

| Атомный номер $Z$ | Изотоп, терм основного состояния, спин ядра $I$                          | Терм         | Квантовые числа полного момента ( $F, F'$ ) | Сверхтонкое расщепление уровней        |                                             |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|
|                   |                                                                          |              |                                             | $\Delta\nu (F, F'), A, B, \text{ МГц}$ | $\Delta E (F, F'), 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ |
| 77                | $^{191}\text{Ir} (^4F_{9/2}), 3/2$                                       | $5^4F_{9/2}$ | (6,5)                                       | 659,265                                | 21,991                                      |
|                   |                                                                          |              | (5,4)                                       | 189,440                                | 6,319                                       |
|                   |                                                                          |              | (4,3)                                       | 84,050                                 | 2,804                                       |
| 78                | $^{183}\text{Ir} (^4F_{9/2}), 3/2$                                       | $5^4F_{9/2}$ | (6,5)                                       | 660,090                                | 22,018                                      |
|                   |                                                                          |              | (5,4)                                       | 224,478                                | 7,488                                       |
|                   |                                                                          |              | (4,3)                                       | 33,535                                 | 1,119                                       |
| 79                | $^{187}\text{Au} (^2S_{1/2}), 3/2$                                       | $6^2S_{1/2}$ | (9/2, 7/2)                                  | $A = 5702,6$<br>$A = 2609,6$           | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (9/2, 7/2)                                  | 3820,56                                | 127,4                                       |
|                   |                                                                          |              | (9/2, 7/2)                                  | 6099,320                               | 203,452                                     |
| 80                | $^{189}\text{Hg} (^1S_0), 1/2$<br>$^{201}\text{Hg} (^1S_0), 3/2$         | $6^3P_2$     | (7/2, 5/2)                                  | $A = 80,24$<br>$B = 1049,8$            | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (5/2, 3/2)                                  | $A = 199,842$<br>$B = 911,077$         | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (3/2, 1/2)                                  | 5377,49                                | 179,37                                      |
| 81                | $^{203}\text{Tl} (^2P_{1/2}), 1/2$<br>$^{205}\text{Tl} (^2P_{1/2}), 1/2$ | $6^3D_3$     | (1,0)                                       | $A = 9066,45$<br>11382,629             | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (2,1)                                       | 8629,522                               | 379,68                                      |
|                   |                                                                          |              | (2,1)                                       | 5377,49                                | 287,85                                      |
| 82                | $^{207}\text{Pb} (^3P_0), 1/2$<br>$^{209}\text{Bi} (^4S_{3/2}), 9/2$     | $6^3D_3$     | (1,0)                                       | $A = -2450$<br>$B = 60$                | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (2,1)                                       | 21105,45                               | 704,0026                                    |
|                   |                                                                          |              | (2,1)                                       | 524,0599                               | 17,4808                                     |
| 83                | $^{207}\text{Pb} (^3P_0), 1/2$<br>$^{209}\text{Bi} (^4S_{3/2}), 9/2$     | $6^3D_3$     | (1,0)                                       | 21310,83                               | 710,8534                                    |
|                   |                                                                          |              | (2,1)                                       | 530,0765                               | 17,6815                                     |
|                   |                                                                          |              | (2,1)                                       | 1524,5                                 | 50,85                                       |
| 92                | $^{235}\text{U} (^5L_6^0), 7/2$                                          | $6^3D_3$     | (5/2, 3/2)                                  | $A_1 = -446,94$<br>$B = -304,65$       | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (5/2, 3/2)                                  | $A = -1227$<br>$B = -620$              | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (5/2, 3/2)                                  | $A \approx 2503$<br>$B = 0$            | —                                           |
| 93                | $^{237}\text{Np} (^6L_{11/2}), 5/2$                                      | $6^3D_3$     | (5/2, 3/2)                                  | $A = 11268$<br>$A = 491,03$            | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (5/2, 3/2)                                  | $B = 978,64$                           | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (5/2, 3/2)                                  | $A = -60,56$<br>$B = 4104,1$           | —                                           |
| 93                | $^{237}\text{Np} (^6L_{11/2}), 5/2$                                      | $6^3D_3$     | (5/2, 3/2)                                  | $A = -68,35$<br>$B = 40,1$             | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (5/2, 3/2)                                  | $A = 778$<br>$B = 645$                 | —                                           |
|                   |                                                                          |              | (5/2, 3/2)                                  | $A = 778$<br>$B = 645$                 | —                                           |

### 32.5. ИЗОТОПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА АТОМНЫХ СПЕКТРОВ

В спектрах элементов, обладающих определенным изотопным составом, наблюдают расщепление линий на ряд компонент, каждая из которых характеризует свой изотоп. Возникновение подобной изотопической структуры спектров обусловлено взаимодействием электронов с ядром. Полный гамильтониан взаимодействия атома в системе центра инерции включает в себя движение нуклонов ядра относительно центра инерции (нормальный или боровский эффект массы), зависящее от массы ядра обменное взаимодействие электронов (специфический эффект массы) и взаимодействие валентных электронов с распределенным протонным зарядом ядра (эф-

фект конечности объема ядра). В итоге наблюдаемое изотопическое смещение в спектральных линиях  $\delta\nu$  для двух изотопов элемента с массовыми числами  $A_1$  и  $A_2$  ( $A = Z + N$ ,  $Z$  — число протонов,  $N$  — число нейтронов) представляется суммой трех слагаемых [10]

$$\delta\nu^{A_1 A_2} = \delta\nu_{BMS}^{A_1 A_2} + \delta\nu_{SS}^{A_1 A_2} + \delta\nu_{VS}^{A_1 A_2}.$$

В приведенном выражении первый член  $\delta\nu_{BMS}^{A_1 A_2} = \nu_{\infty} m_e (M_2 - M_1) / M_1 M_2$  характеризует нормальное массовое смещение, наиболее важное для легких элементов ( $Z < 30$ ), причем  $\nu_{\infty}$  — частота излучательного перехода при бесконечной массе ядер;  $m_e$  — масса электрона;  $M_1, M_2$  — массы ядер;  $\delta\nu_{SS}^{A_1 A_2}$  — специфическое мас-

совое смещение;  $\delta\nu_{VS}^{A_1A_2}$  — объемное смещение между линиями двух изотопов, доминирующее в спектре тяжелых элементов ( $Z \geq 60$ ). В спектрах элементов середины таблицы Менделеева ( $Z \sim 20 \div 25$ ) наблюдаемое изотопическое смещение мало по абсолютной величине.

Изотопический сдвиг в спектральных линиях  $\delta\nu$  обусловлен смещением электронных термов атомов и связан с изотопическими сдвигами верхнего ( $\delta T'$ ) и нижнего ( $\delta T$ ) термов соотношением

$$\delta\nu = \delta T' - \delta T.$$

Изотопический сдвиг условно принято считать положительным, если линия перехода для более тяжелого изотопа сдвинута в сторону больших частот. На языке сдвига термов это означает, что отрицательный знак смещения термов соответствует случаю, когда уровень

более тяжелого изотопа лежит глубже (его расстояние до границы непрерывного спектра больше) уровня более легкого изотопа. Нормальный массовый эффект приводит к росту энергии связи электрона в более тяжелом изотопе, тогда как вследствие эффекта конечности объема ядра энергия связи электронов меньше для изотопов с большей массой; в итоге эффекты объема и массы ядра противоположны по знаку. При наличии сверхтонкой структуры атомных уровней изотопический сдвиг термов определяется по расстоянию между центрами тяжести компонент сверхтонкой структуры.

В табл. 32.4 включены значения изотопического сдвига  $\delta\nu$  резонансных линий для ряда элементов [10—13]. С учетом установленной погрешности измерений числовые значения были округлены по последней значащей цифре ( $\pm 1$ ).

Таблица 32.4. Изотопическое смещение резонансных линий атомов

| Атомный номер Z | Элемент (основной терм)          | Переход между термами                                                      | Длина волны $\lambda$ , $10^{-10}$ м | Массовые числа изотопов $A_1-A_2$                                             | Изотопическое смещение линий $\delta\nu_{A_1A_2}$ , $10^{-3}$ см $^{-1}$ |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1               | H<br>( $1s-2S_{1/2}$ )           | $1^2S_{1/2}-2^2P^{\circ}$                                                  | 1215,7                               | 1—2<br>1—3<br>2—3                                                             | $2,238 \cdot 10^4$<br>$2,983 \cdot 10^4$<br>$7,477 \cdot 10^3$           |
| 2               | He<br>( $1s^2-1S_0$ )            | $1^1S_0-2^1P^{\circ}$                                                      | 584,3                                | 3—4                                                                           | $8,8 \cdot 10^3$                                                         |
| 3               | Li<br>( $2s-2^2S_{1/2}$ )        | $2^2S_{1/2}-2^2P^{\circ}$                                                  | 6708                                 | 6—7                                                                           | 351,3                                                                    |
| 5               | B<br>( $2p-2^2P^{\circ}_{1/2}$ ) | $2p^2 P^{\circ}-3s^2 S_{1/2}$                                              | 2497                                 | 10—11                                                                         | —170                                                                     |
| 6               | C<br>( $2p^2-3P_0$ )             | $2p^2^1S_0-2p^3s^1P^{\circ}_1$                                             | 2478,6                               | 12—13                                                                         | —160                                                                     |
| 7               | N<br>( $2p^3-4^{\circ}S_{1/2}$ ) | $3s^2 P_{3/2}-3p^2 P^{\circ}_{3/2}$<br>$3s^4 P_{5/2}-3p^4 P^{\circ}_{5/2}$ | 8629,2<br>8216,3                     | 14—15<br>14—15                                                                | 70<br>—60                                                                |
| 8               | O<br>( $2p^4-3P_2$ )             | $3s^3 S_1-3p^3 P_1$                                                        | 8446,8                               | 16—18                                                                         | 140                                                                      |
| 10              | Ne<br>( $2p^6-1S_0$ )            | $3s' [1/2]_1-3p [5/2]_2$<br>$3s [3/2]_2-3p [1/2]_1$                        | 7173,9<br>7032,4                     | 20—22<br>20—22                                                                | 70<br>50                                                                 |
| 11              | Na<br>( $3s-2^2S_{1/2}$ )        | $3s^2 S_{1/2}-4p^2 P^{\circ}_{1/2}$                                        | 3303,0                               | 23—24                                                                         | 24                                                                       |
| 12              | Mg<br>( $3s^2-1S_0$ )            | $3s^2^1S_0-3s3p^1P^{\circ}_1$                                              | 2852,1                               | 24—25<br>24—26                                                                | 50<br>60                                                                 |
| 18              | Ar<br>( $3s^4-1S_0$ )            | $4s [3/2]_2-4p' [3/2]_1$<br>$4s' [1/2]_1-5p [1/2]_0$                       | 7147,0<br>4510,7                     | 36—40<br>36—40                                                                | 20<br>50                                                                 |
| 19              | K<br>( $4s-2^2S_{1/2}$ )         | $4s^2 S_{1/2}-4p^2 P^{\circ}_{1/2}$<br>$4s^2 S_{1/2}-4p^2 P^{\circ}_{3/2}$ | 7699,0<br>7654,9                     | 39—40<br>39—41<br>39—40<br>39—41                                              | 4,19<br>7,85<br>4,22<br>7,88                                             |
| 20              | Ca<br>( $4s^2-1S_0$ )            | $4s^2^1S_0-4s4p^1P^{\circ}_1$<br>$4s^2^1S_0-4s4p^3P^{\circ}_1$             | 4226,7<br>6572,8                     | 40—42<br>40—43<br>40—44<br>40—48<br>40—41<br>40—42<br>40—43<br>40—44<br>40—48 | 13,0<br>20,4<br>25,7<br>50,4<br>9,37<br>17,0<br>26,1<br>33,2<br>64,1     |

| Атомный номер Z | Элемент (основной терм)         | Переход между термами                       | Длина волны $\lambda$ , $10^{-10}$ м | Массовые числа изотопов $A_1-A_2$    | Изотопическое смещение линий $\delta_{\nu A_1 A_2}$ , $10^{-3}$ см $^{-1}$ |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 29              | Cu<br>( $3d^{10}4s-^2S_{1/2}$ ) | $4s\ ^2S_{1/2}-4p\ ^2P_{1/2}^\circ$         | 3274,0                               | 63—65                                | 20                                                                         |
| 30              | Zn<br>( $4s^2-^1S_0$ )          | $4s^2\ ^1S_0-4s4p\ ^1P_1^\circ$             | 2138,6                               | $\Delta A = 2$<br>(среднее значение) | 16                                                                         |
| 31              | Ga<br>( $4p-^2P_{1/2}^\circ$ )  | $4p\ ^2P_{1/2}^\circ-5s\ ^2S_{1/2}$         | 4033,0                               | 69—71                                | —1,1                                                                       |
| 36              | Kr<br>( $4p^6-^1S_0$ )          | $4p\ ^2P_{3/2}^\circ-5s\ ^2S_{1/2}$         | 4172,1                               | 69—71                                | —1,3                                                                       |
| 37              | Rb<br>( $5s-^2S_{1/2}$ )        | $5s\ [3/2]_1^\circ-5p\ [5/2]_2$             | 8776,7                               | 82—84                                | 2                                                                          |
| 38              | Sr<br>( $5s^2-^1S_0$ )          | $5s\ ^2S_{1/2}-5p\ ^2P_{1/2}^\circ$         | 7947,6                               | 85—87                                | 2,6                                                                        |
|                 |                                 | $5s\ ^2S_{1/2}-5p\ ^2P_{3/2}^\circ$         | 7800,2                               | 85—87                                | 2,6                                                                        |
|                 |                                 | $5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^1P_1^\circ$             | 4607,3                               | 84—88                                | 9,0                                                                        |
|                 |                                 |                                             |                                      | 86—88                                | 4,2                                                                        |
|                 |                                 |                                             |                                      | 87—88                                | 1,5                                                                        |
|                 |                                 | $5s^2\ ^1S_0-5s6p\ ^1P_1^\circ$             | 2931,8                               | 84—88                                | 15,9                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 86—88                                | 7,5                                                                        |
|                 |                                 |                                             |                                      | 87—88                                | 3,2                                                                        |
|                 |                                 | $5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^3P_1^\circ$             | 6892,6                               | 84—88                                | 14,1                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 86—88                                | 6,7                                                                        |
|                 |                                 |                                             |                                      | 87—88                                | 2,7                                                                        |
| 40              | Zr<br>( $4d^25s^2-^3F_2$ )      | $4d^35s\ ^5F_6-4d^35p\ ^5G_6^\circ$         | 4687,8                               | 90—92                                | —12                                                                        |
|                 |                                 |                                             |                                      | 92—94                                | —7                                                                         |
|                 |                                 |                                             |                                      | 94—96                                | —5                                                                         |
| 47              | Ag<br>( $4d^{10}5s-^2S_{1/2}$ ) | $4d^{10}5s\ ^2S_{1/2}-5p\ ^2P_{1/2}^\circ$  | 3382,9                               | 107—109                              | —15                                                                        |
|                 |                                 | $4d^{10}5s\ ^2S_{1/2}-5p\ ^2P_{3/2}^\circ$  | 3280,7                               | 107—109                              | —15                                                                        |
| 48              | Cd<br>( $5s^2-^1S_0$ )          | $5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^3P_1^\circ$             | 3261,0                               | $\Delta A = 2$<br>(среднее значение) | —15                                                                        |
| 49              | In<br>( $5p-^2P_{1/2}^\circ$ )  | $5p\ ^2P_{1/2}^\circ-6s\ ^2S_{1/2}$         | 4101,8                               | 113—115                              | 8,6                                                                        |
| 54              | Xe<br>( $5p^6-^1S_0$ )          | $5p\ ^2P_{3/2}^\circ-6s\ ^2S_{1/2}$         | 4511,3                               | 113—115                              | 8,5                                                                        |
|                 |                                 | $6s\ [3/2]_2^\circ-6p\ [3/2]_2$             | 8231,6                               | 134—136                              | —3                                                                         |
| 55              | Cs<br>( $6s-^2S_{1/2}$ )        | $6s\ ^2S_{1/2}-6p\ ^2P_{3/2}^\circ$         | 8521,1                               | 133—134                              | 1,2                                                                        |
|                 |                                 |                                             |                                      | 133—135                              | 1,2                                                                        |
| 70              | Yb<br>( $4f^{14}6s^2-^1S_0$ )   | $6s^2\ ^1S_0-6s6p\ ^1P_1^\circ$             | 3988,0                               | 174—176                              | 17                                                                         |
|                 |                                 |                                             |                                      | 174—172                              | 18                                                                         |
| 71              | Lu<br>( $5d6s^2-^2D_{3/2}$ )    | $5d6s^2\ ^2D_{3/2}-5d6s6p\ ^4F_{3/2}^\circ$ | 5736,5                               | 175—176                              | —13,1                                                                      |
|                 |                                 | $5d6s^2\ ^2D_{5/2}-5d6s6p\ ^4F_{5/2}^\circ$ | 6055,0                               | 175—176                              | —13,9                                                                      |
|                 |                                 | $5d6s^2\ ^2D_{5/2}-5d6s6p\ ^4F_{7/2}^\circ$ | 5421,9                               | 175—176                              | —13,6                                                                      |
| 79              | Au<br>( $5d^{10}6s-^2S_{1/2}$ ) | $6s\ ^2S_{1/2}-6p\ ^2P_{1/2}^\circ$         | 2675,9                               | 195—197                              | —100                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 193—197                              | —210                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 192—197                              | —280                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 191—197                              | —320                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 190—197                              | —370                                                                       |
| 80              | Hg<br>( $5d^{10}6s^2-^1S_0$ )   | $6s^2\ ^1S_0-6s6p\ ^3P_1^\circ$             | 2536,5                               | 198—199                              | —9                                                                         |
|                 |                                 |                                             |                                      | 198—200                              | —160                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 199—201                              | —210                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 200—202                              | —180                                                                       |
|                 |                                 |                                             |                                      | 202—204                              | —160                                                                       |

| Атомный номер $Z$ | Элемент (основной терм)            | Переход между термами             | Длина волны $\lambda$ , $10^{-10}$ м | Массовые числа изотопов $A_1-A_2$        | Изотопическое смещение линий $\delta \nu A_1 A_2$ , $10^{-3}$ см $^{-1}$ |
|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 81                | Tl<br>( $6s^2 6p-2P_{1/2}^\circ$ ) | $6p\ 2P_{3/2}^\circ-7s\ 2S_{1/2}$ | 5350,5                               | 203—205                                  | —58,6                                                                    |
| 82                | Pb<br>( $6p^2-3P_0$ )              | $6p^2\ 3P_0-6p7s\ 3P_1^\circ$     | 2833,1                               | 207—208<br>206—208<br>204—208<br>202—208 | —47<br>—75<br>—140<br>—207                                               |

## 32.6. СПЕКТРЫ ДВУХАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ

Полосатые молекулярные спектры поглощения и излучения возникают при переходах между дискретными уровнями молекул. В точной постановке задача определения энергетических уровней молекулы не имеет решения и для учета взаимного влияния движения электронов и ядер, связи спиновых моментов с орбитальными и т. д. приходится опираться на приближенные методы, использующие характерные особенности внутримолекулярных взаимодействий. Вследствие заметной разницы в массах скорость движения электронов в молекулах велика по сравнению со скоростью движения ядер и стало быть электроны и ядра вносят неодинаковый вклад в полную энергию молекулы. При этом оказалось возможным отделить проблему определения энергии, связанной с движением электронов в поле ядер, от энергии собственно ядерного движения и учесть методами последовательных приближений взаимное влияние электронной (характеризующейся относительно большой частотой переходов) и ядерной (характеризующейся относительно малой частотой переходов) подсистем в молекуле.

В итоге с практически достаточной во многих случаях точностью можно представить полную энергию двухатомной молекулы в заданном состоянии  $n$  в виде суммы

$$E_n = T_e + T_{vJ},$$

где  $T_e$  — электронная, а  $T_{vJ}$  — колебательно-вращательная энергия;  $v, J$  — колебательное и вращательное квантовые числа молекулы соответственно. Для не слишком возбужденных колебательных состояний в молекуле можно воспользоваться тем или иным разложением энергии  $T_{vJ}$  в ряд по степеням квантовых чисел  $v$  и  $J$ , например в виде,

$$T_{vJ} = G(v) + F_v(J) = [\omega_e(v + 1/2) -$$

$$- \omega_e x_e(v + 1/2)^2 + \dots] + [B_v J(J + 1) - D_v J^2(J + 1)^2 + \dots].$$

В приведенном выражении колебательная энергия молекулы  $G(v)$  соответствует модели так называемого ангармонического осциллятора, причем  $\omega_e$  — частота гармонических колебаний,  $\omega_e x_e$  — постоянная ангармонизма. Вращательная энергия молекулы  $F_v(J)$  соответствует модели нежесткого ротатора и учитывает взаимодействие между колебательным и вращательным движениями молекулы, так что вращательные постоянные  $B_v, D_v, \dots$  зависят от уровня колебательного возбуждения  $v$ :  $B_v = B_e - \alpha_e(v + 1/2) + \dots$ ,  $D_v = D_e + \beta_e(v + 1/2) + \dots$ , здесь индекс  $e$  относится к равновесному межъядерному расстоянию двухатомной молекулы.

С учетом проведенного выше разбиения энергии молекулы можно записать волновое число для перехода между выделенными состояниями  $n'$  и  $n''$  в виде:  $\nu = E_{n'} - E_{n''} = T_e' + G' + F' - (T_e'' + G'' + F'')$ . Соответственно наблюдают спектры нескольких типов: а) вращательные спектры, отвечающие переходам между вращательными уровнями в пределах неизменного колебательного и электронного состояния; б) колебательно-вращательные спектры, возникающие при переходах между вращательными уровнями разных колебательных состояний при неизменном электронном состоянии; в) электронные спектры, характеризующие переходы между колебательно-вращательными уровнями разных электронных состояний. Помимо того, в радиочастотной и микроволновой областях спектра наблюдают переходы между подуровнями тонкой структуры для данного электронно-колебательно-вращательного уровня молекулы, а также спектры электронно-спиновых и ядерно-магнитного резонансов, соответствующих переходам между зеемановскими компонентами расщепленных в магнитном поле уровней молекулы.

Таблица 32.5. Спектроскопические постоянные основных состояний двухатомных молекул

| Молекула        | Терм основного состояния | Равновесное межъядерное расстояние $r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота гармонических колебаний $\omega_e$ , см $^{-1}$ | Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$ , см $^{-1}$ | Вращательная постоянная $B_e$ , см $^{-1}$ | Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия $\alpha_e$ , $10^{-3}$ см $^{-1}$ | Приведенная масса для доминантного изотопного состава $\mu$ , а. е. м. | Энергия диссоциации $D_0$ , $10^4$ см $^{-1}$ |
|-----------------|--------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Ag <sub>2</sub> | X $1\Sigma_g^+$          | 2,7                                                     | 192,4                                                   | 0,64                                                | 0,496                                      | 0,19                                                                                   | 53,948                                                                 | 1,34                                          |
| AgBr            | X $1\Sigma^+$            | 2,393                                                   | 247,7                                                   | 0,68                                                | 0,0634                                     | 0,228                                                                                  | 46,424                                                                 | 2,5                                           |
| AgCl            | X $1\Sigma^+$            | 2,281                                                   | 343,5                                                   | 1,17                                                | 0,123                                      | 0,6                                                                                    | 26,350                                                                 | 2,60                                          |
| AgF             | X $1\Sigma^+$            | 1,983                                                   | 513,45                                                  | 2,59                                                | 0,266                                      | 1,92                                                                                   | 16,132                                                                 | 2,9                                           |
| AgH             | X $1\Sigma^+$            | 1,618                                                   | 1760                                                    | 34,1                                                | 6,449                                      | 201                                                                                    | 0,9984                                                                 | 1,84                                          |
| AgI             | X $1\Sigma^+$            | 2,545                                                   | 206,5                                                   | 0,44                                                | 0,0449                                     | 0,15                                                                                   | 58,025                                                                 | 2,1                                           |



| Молекула        | Терм<br>основного<br>состояния | Равновесное<br>межъядерное<br>расстояние<br>$r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота<br>гармонических<br>колебаний<br>$\omega_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>ангармонизма<br>$\omega_e x_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Вращательная<br>постоянная<br>$B_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>колебательно-<br>вращательного<br>взаимодей-<br>ствия $\alpha_e$ ,<br>$10^{-3}$ $\text{см}^{-1}$ | Приведенная<br>масса для<br>доминантного<br>изотопного<br>состава $\mu_A$ ,<br>а. е. м. | Энергия<br>диссоциации<br>$D_0$ , $10^4$ $\text{см}^{-1}$ |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| AgO             | $X^2\Pi_{1/2}$                 | 2,003                                                            | 490,2                                                                  | 3,1                                                             | 0,3020                                                 | 2,5                                                                                                            | 13,913                                                                                  | 1,8                                                       |
| Al <sub>2</sub> | $X^3\Sigma_g^-$                | 2,47                                                             | 350,0                                                                  | 2,02                                                            | 0,2054                                                 | 1,2                                                                                                            | 13,491                                                                                  | 1,5                                                       |
| AlBr            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,295                                                            | 378,2                                                                  | 1,33                                                            | 0,1592                                                 | 0,86                                                                                                           | 20,107                                                                                  | 3,6                                                       |
| AlCl            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,130                                                            | 481,3                                                                  | 1,95                                                            | 0,2439                                                 | 1,61                                                                                                           | 15,230                                                                                  | 4,13                                                      |
| AlF             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,6544                                                           | 802,3                                                                  | 4,8                                                             | 0,552                                                  | 5,0                                                                                                            | 11,148                                                                                  | 5,6                                                       |
| AlH             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,648                                                            | 1683                                                                   | 29,1                                                            | 6,3907                                                 | 186                                                                                                            | 0,9715                                                                                  | 2,5                                                       |
| AlI             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,537                                                            | 316,1                                                                  | 1,0                                                             | 0,1177                                                 | 0,559                                                                                                          | 22,251                                                                                  | 3,0                                                       |
| AlO             | $X^2\Sigma^+$                  | 1,618                                                            | 979,2                                                                  | 6,97                                                            | 0,6414                                                 | 5,8                                                                                                            | 10,042                                                                                  | 4,23                                                      |
| AlS             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,029                                                            | 617,1                                                                  | 3,33                                                            | 0,2799                                                 | 1,8                                                                                                            | 14,633                                                                                  | 3,1                                                       |
| AlSe            | $X^2\Sigma$                    | —                                                                | 467,6                                                                  | 2,08                                                            | —                                                      | —                                                                                                              | 20,171                                                                                  | 2,8                                                       |
| Ar <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 3,76                                                             | 25,7*                                                                  | 2,6                                                             | 0,060                                                  | 3,7                                                                                                            | 19,981                                                                                  | 0,00848                                                   |
| As <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 2,103                                                            | 429,6                                                                  | 1,12                                                            | 0,1018                                                 | 0,333                                                                                                          | 37,461                                                                                  | 3,2                                                       |
| AsF             | $X_1^3\Sigma^-$                | 1,736                                                            | 685,8                                                                  | 3,1                                                             | 0,365                                                  | 2,4                                                                                                            | 15,155                                                                                  | 3,4                                                       |
| AsH             | $X^3\Sigma^-$                  | 1,523                                                            | 2180                                                                   | 50                                                              | 7,307                                                  | 212                                                                                                            | 0,9944                                                                                  | 2,9                                                       |
| AsN             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,618                                                            | 1068,5                                                                 | 5,41                                                            | 0,5455                                                 | 3,37                                                                                                           | 11,798                                                                                  | 5,2                                                       |
| AsO             | $X^2\Pi_{1/2}$                 | 1,624                                                            | 967,1                                                                  | 4,85                                                            | 0,4848                                                 | 3,30                                                                                                           | 13,181                                                                                  | 3,99                                                      |
| AsP             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,00                                                             | 604,0                                                                  | 2,0                                                             | 0,192                                                  | 0,8                                                                                                            | 21,914                                                                                  | 3,6                                                       |
| AsS             | $X_1^2\Pi_{1/2}$               | 2,017                                                            | 567,9                                                                  | 1,97                                                            | 0,1848                                                 | 0,8                                                                                                            | 22,409                                                                                  | 3,0                                                       |
| Au <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 2,472                                                            | 190,9                                                                  | 0,420                                                           | 0,028                                                  | 0,072                                                                                                          | 98,483                                                                                  | 1,86                                                      |
| AuAl            | $X^1\Sigma^+(O^+)$             | 2,338                                                            | 333,0                                                                  | 1,16                                                            | 0,1299                                                 | 0,67                                                                                                           | 23,731                                                                                  | 2,69                                                      |
| AuBe            | $X^2\Sigma^+$                  | 2,060                                                            | 607,7                                                                  | 3,5                                                             | 0,4607                                                 | 4,0                                                                                                            | 8,6179                                                                                  | 2,3                                                       |
| AuH             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,524                                                            | 2305,0                                                                 | 43,1                                                            | 7,240                                                  | 214                                                                                                            | 1,0027                                                                                  | 2,6                                                       |
| AuMg            | $X^2\Sigma^+$                  | 2,443                                                            | 307,9                                                                  | 1,1                                                             | 0,1321                                                 | 0,7                                                                                                            | 21,381                                                                                  | 2,0                                                       |
| B <sub>2</sub>  | $X^3\Sigma_g^-$                | 1,589                                                            | 1051,3                                                                 | 9,4                                                             | 1,212                                                  | 14                                                                                                             | 5,5047                                                                                  | 2,4                                                       |
| BBr             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,89                                                             | 684,3                                                                  | 3,52                                                            | 0,489                                                  | 3,5                                                                                                            | 9,6615                                                                                  | 3,6                                                       |
| BCl             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,716                                                            | 839,1                                                                  | 5,11                                                            | 0,6838                                                 | 6,46                                                                                                           | 8,3732                                                                                  | 4,5                                                       |
| BF              | $X^1\Sigma^+$                  | 1,2626                                                           | 1402,1                                                                 | 11,8                                                            | 1,5072*                                                | 19,8                                                                                                           | 6,9702                                                                                  | 6,30                                                      |
| BH              | $X^1\Sigma^+$                  | 1,232                                                            | 2367                                                                   | 49,4                                                            | 12,02                                                  | 412                                                                                                            | 0,9233                                                                                  | 2,76                                                      |
| BI              | $X^1\Sigma^+$                  | 2,14*                                                            | 575                                                                    | 3,0                                                             | 0,36*                                                  | —                                                                                                              | 10,1305                                                                                 | —                                                         |
| BN              | $X^3\Pi$                       | 1,281                                                            | 1515                                                                   | 12,3                                                            | 1,666                                                  | 25                                                                                                             | 6,1635                                                                                  | 2,6                                                       |
| BO              | $X^2\Sigma^+$                  | 1,2048                                                           | 1885,3                                                                 | 11,7                                                            | 1,7811                                                 | 16,5                                                                                                           | 6,5209                                                                                  | 6,68                                                      |
| BS              | $X^2\Sigma^+$                  | 1,609                                                            | 1180,2                                                                 | 6,31                                                            | 0,7949                                                 | 6,0                                                                                                            | 8,1894                                                                                  | 4,85                                                      |
| BaBr            | $X^2\Sigma^+$                  | 2,8445                                                           | 193,8                                                                  | 0,41                                                            | 0,0415                                                 | 0,122                                                                                                          | 50,194                                                                                  | 3,1                                                       |
| BaCl            | $X^2\Sigma^+$                  | 2,683                                                            | 279,9                                                                  | 0,80                                                            | 0,0840                                                 | 0,334                                                                                                          | 27,895                                                                                  | 3,7                                                       |
| BaF             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,159                                                            | 469,4                                                                  | 1,83                                                            | 0,2165                                                 | 1,16                                                                                                           | 16,698                                                                                  | 4,88                                                      |
| BaH             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,2317                                                           | 1168,3                                                                 | 14,5                                                            | 3,3828                                                 | 66                                                                                                             | 1,0005                                                                                  | 1,45                                                      |
| BaI             | $X^2\Sigma^+$                  | 3,085                                                            | 152,1                                                                  | 0,27                                                            | 0,0268                                                 | 0,066                                                                                                          | 66,088                                                                                  | 3,56                                                      |
| BaO             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,9397                                                           | 669,8                                                                  | 2,03                                                            | 0,3126                                                 | 1,39                                                                                                           | 14,333                                                                                  | 4,69                                                      |
| BaS             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,507                                                            | 379,4                                                                  | 0,884                                                           | 0,1033                                                 | 0,32                                                                                                           | 25,955                                                                                  | 3,52                                                      |
| Be <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 2,45                                                             | 223,4*                                                                 | 20                                                              | 0,618                                                  | 20                                                                                                             | 4,5061                                                                                  | 0,067                                                     |

| Молекула        | Терм. основного состояния | Равновесное межъядерное расстояние $r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота гармонических колебаний $\omega_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Вращательная постоянная $B_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия $\omega_e$ , $10^{-3} \text{ см}^{-1}$ | Приведенная масса для доминирующего изотопного состава $\mu_A$ , а. е. м. | Энергия диссоциации $D_0$ , $10^4 \text{ см}^{-1}$ |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| BeBr            | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,953*                                                  | 715                                                           | 3,8                                                       | 0,546*                                           | —                                                                                           | 8,0885                                                                    | 3,3                                                |
| BeCl            | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,797                                                   | 846,7                                                         | 4,8                                                       | 0,7285                                           | 6,9                                                                                         | 7,1655                                                                    | 3,6                                                |
| BeF             | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,361                                                   | 1267                                                          | 9,1                                                       | 1,489                                            | 17,6                                                                                        | 6,1126                                                                    | 5,05                                               |
| BeH             | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,345                                                   | 2071,9                                                        | 48,1                                                      | 10,274                                           | 207                                                                                         | 0,9065                                                                    | 1,64                                               |
| BeI             | $X \ ^2\Sigma^+$          | 2,179*                                                  | 611,7                                                         | 1,6                                                       | 0,422*                                           | —                                                                                           | 8,4146                                                                    | —                                                  |
| BeO             | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,331                                                   | 1487,3                                                        | 11,83                                                     | 1,651                                            | 19,0                                                                                        | 5,7643                                                                    | 3,7                                                |
| BeS             | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,742                                                   | 997,9                                                         | 6,14                                                      | 0,7906                                           | 6,64                                                                                        | 7,0305                                                                    | 3,1                                                |
| Bi <sub>2</sub> | $X \ ^1\Sigma_g^+$        | 2,661                                                   | 173,06                                                        | 0,376                                                     | 0,0228                                           | 0,053                                                                                       | 104,49                                                                    | 1,6                                                |
| BiBr            | $X \ O^+$                 | 2,6095                                                  | 209,5                                                         | 0,5                                                       | 0,0432                                           | 0,133                                                                                       | 57,285                                                                    | 2,21                                               |
| BiCl            | $X \ O^+$                 | 2,5                                                     | 308                                                           | 1,0                                                       | 0,09                                             | —                                                                                           | 29,956                                                                    | 2,5                                                |
| BiF             | $X_1 \ O^+$               | 2,051                                                   | 513                                                           | 2,3                                                       | 0,230                                            | 1,5                                                                                         | 17,415                                                                    | 2,7                                                |
| BiH             | $X \ ^3\Sigma^-(O^+)$     | 1,80                                                    | 1635,7*                                                       | 32                                                        | 2,59                                             | 54                                                                                          | 1,9949                                                                    | 2,0                                                |
| BiI             | $X \ O^+$                 | 2,800                                                   | 163,9                                                         | 0,28                                                      | 0,0272                                           | 0,070                                                                                       | 78,957                                                                    | 1,57                                               |
| BiO             | $X_1 \ ^2\Pi_{1/2}$       | 1,93                                                    | 692                                                           | 4,3                                                       | 0,303                                            | 2                                                                                           | 14,858                                                                    | 2,8                                                |
| BiS             | $X \ ^2\Pi_{1/2}$         | 2,319                                                   | 408,7                                                         | 1,5                                                       | 0,1128*                                          | 0,49                                                                                        | 27,730                                                                    | 2,6                                                |
| Br <sub>2</sub> | $X \ ^1\Sigma_g^+(O_g^+)$ | 2,281                                                   | 325,32                                                        | 1,077                                                     | 0,0821                                           | 0,318                                                                                       | 39,459                                                                    | 1,589                                              |
| BrCl            | $X \ ^1\Sigma^+$          | 2,136                                                   | 444,28                                                        | 1,84                                                      | 0,1525                                           | 0,77                                                                                        | 24,232                                                                    | 1,61                                               |
| BrF             | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,759                                                   | 670,75                                                        | 4,05                                                      | 0,3558                                           | 2,61                                                                                        | 15,312                                                                    | 2,055                                              |
| BrO             | $X_1 \ ^2\Pi_{3/2}$       | 1,717                                                   | 779                                                           | 6,8                                                       | 0,4296                                           | 3,64                                                                                        | 13,299                                                                    | 1,93                                               |
| C <sub>2</sub>  | $X \ ^1\Sigma_g^+$        | 1,2425                                                  | 1854,7                                                        | 13,34                                                     | 1,820                                            | 17,6                                                                                        | 6,0000                                                                    | 5,01                                               |
| CCl             | $X \ ^2\Pi_{1/2}$         | 1,645                                                   | 876,74                                                        | 5,33                                                      | 0,6971                                           | 6,7                                                                                         | 8,9341                                                                    | 3,3                                                |
| CF              | $X \ ^2\Pi_r$             | 1,272                                                   | 1308,1                                                        | 11,1                                                      | 1,417                                            | 18,4                                                                                        | 7,3546                                                                    | 4,57                                               |
| CH              | $X \ ^2\Pi_r$             | 1,120                                                   | 2858,5                                                        | 63,0                                                      | 14,46                                            | 534                                                                                         | 0,9297                                                                    | 2,79                                               |
| CN              | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,172                                                   | 2068,6                                                        | 13,1                                                      | 1,8997                                           | 17,37                                                                                       | 6,4622                                                                    | 6,26                                               |
| CO              | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,1283                                                  | 2169,81                                                       | 13,29                                                     | 1,93128                                          | 17,50                                                                                       | 6,8562                                                                    | 8,946                                              |
| CP              | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,562                                                   | 1239,7                                                        | 6,86                                                      | 0,7986                                           | 5,97                                                                                        | 8,6491                                                                    | 4,3                                                |
| CS              | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,535                                                   | 1285,16                                                       | 6,50                                                      | 0,8200                                           | 5,92                                                                                        | 8,7252                                                                    | 5,93                                               |
| CSe             | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,676                                                   | 1035,4                                                        | 4,9                                                       | 0,575                                            | 3,8                                                                                         | 10,433                                                                    | 4,8                                                |
| Ca <sub>2</sub> | $X \ ^1\Sigma^+$          | 4,278                                                   | 64,93                                                         | 1,065                                                     | 0,04612                                          | 0,70                                                                                        | 19,981                                                                    | 0,106                                              |
| CaBr            | $X \ ^2\Sigma^+$          | 2,594                                                   | 285                                                           | 0,9                                                       | 0,0945                                           | 0,404                                                                                       | 26,529                                                                    | 2,6                                                |
| CaCl            | $X \ ^2\Sigma^+$          | 2,4368                                                  | 370,20                                                        | 1,373                                                     | 0,1522                                           | 0,799                                                                                       | 18,650                                                                    | 3,47                                               |
| CaF             | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,967                                                   | 581*                                                          | 2,74                                                      | 0,338                                            | 2,6                                                                                         | 12,877                                                                    | 4,4                                                |
| CaH             | $X \ ^2\Sigma^+$          | 2,002                                                   | 1298,3                                                        | 19,1                                                      | 4,277                                            | 97                                                                                          | 0,9830                                                                    | 1,4                                                |
| CaI             | $X \ ^2\Sigma^+$          | 2,829                                                   | 238,6                                                         | 0,628                                                     | 0,0693                                           | 0,263                                                                                       | 30,392                                                                    | 2,2                                                |
| CaO             | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,822                                                   | 732,1                                                         | 4,8                                                       | 0,444                                            | 3,4                                                                                         | 11,423                                                                    | 3,8                                                |
| CaS             | $X \ ^1\Sigma^+$          | 2,318                                                   | 462,2                                                         | 1,78                                                      | 0,17667                                          | 0,84                                                                                        | 17,762                                                                    | 2,8                                                |
| CdH             | $X \ ^2\Sigma^+$          | 1,781*                                                  | 1337,1                                                        | —                                                         | 5,323*                                           | —                                                                                           | 0,9990                                                                    | 0,55                                               |
| Cl <sub>2</sub> | $X \ ^1\Sigma_g^+$        | 1,988                                                   | 559,7                                                         | 2,67                                                      | 0,2440                                           | 1,5                                                                                         | 17,484                                                                    | 1,9997                                             |
| ClF             | $X \ ^1\Sigma^+$          | 1,6283                                                  | 786,15                                                        | 6,16                                                      | 0,5165                                           | 4,36                                                                                        | 12,310                                                                    | 2,111                                              |
| ClO             | $X \ ^2\Pi_i$             | 1,570                                                   | 854                                                           | 5,5                                                       | 0,6234                                           | 6                                                                                           | 10,975                                                                    | 2,218                                              |

| Молекула        | Терм<br>основного<br>состояния | Равновесное<br>межъядерное<br>расстояние<br>$r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота<br>гармониче-<br>ских колеба-<br>ний $\omega_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>ангармонизма<br>$\omega_e^x$ , $\text{см}^{-1}$ | Вращательная<br>постоянная<br>$B_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>колебательно-<br>вращательного<br>взаимодей-<br>ствия $a_e$ ,<br>$10^{-8}$ $\text{см}^{-1}$ | Приведенная<br>масса для<br>доминантного<br>изотопного<br>состава $\mu$ , а. е. м. | Энергия<br>диссоциации<br>$D_0$ , $10^4$ $\text{см}^{-1}$ |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Cr <sub>2</sub> | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 1,679                                                            | 452,3*                                                                     | 9                                                             | 0,230                                                  | 4                                                                                                         | 25,970                                                                             | 1,26                                                      |
| CrH             | $X\ ^6\Sigma$                  | 1,656                                                            | 1581*                                                                      | 30                                                            | 6,22                                                   | 180                                                                                                       | 0,9886                                                                             | 2,3                                                       |
| CrO             | $X\ ^5\Pi_r$                   | 1,61                                                             | 898                                                                        | 6,7                                                           | 0,53                                                   | 5                                                                                                         | 12,229                                                                             | 3,2                                                       |
| Cs <sub>2</sub> | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 4,648                                                            | 42,02                                                                      | 0,082                                                         | 0,0127                                                 | 0,026                                                                                                     | 66,453                                                                             | 0,3628                                                    |
| CsBr            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 3,072                                                            | 149,7                                                                      | 0,37                                                          | 0,036                                                  | 0,12                                                                                                      | 49,516                                                                             | 3,36                                                      |
| CsCl            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,906                                                            | 214,2                                                                      | 0,73                                                          | 0,072                                                  | 0,34                                                                                                      | 27,685                                                                             | 3,69                                                      |
| CsF             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,345                                                            | 352,6                                                                      | 1,61                                                          | 0,1844                                                 | 1,18                                                                                                      | 16,622                                                                             | 4,15                                                      |
| CsH             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,494                                                            | 891                                                                        | 12,9                                                          | 2,710                                                  | 58                                                                                                        | 1,0002                                                                             | 1,436                                                     |
| CsI             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 3,315                                                            | 119,2                                                                      | 0,254                                                         | 0,0236                                                 | 0,068                                                                                                     | 64,918                                                                             | 2,87                                                      |
| Cu <sub>2</sub> | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 2,220                                                            | 264,5*                                                                     | 1,02                                                          | 0,1087                                                 | 0,61                                                                                                      | 31,465                                                                             | 1,64                                                      |
| CuBr            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,173                                                            | 315                                                                        | 0,96                                                          | 0,1019                                                 | 0,45                                                                                                      | 35,011                                                                             | 1,9                                                       |
| CuCl            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,051                                                            | 415,3                                                                      | 1,58                                                          | 0,176                                                  | 1,00                                                                                                      | 22,728                                                                             | 3,17                                                      |
| CuF             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 1,745                                                            | 621,55                                                                     | 3,49                                                          | 0,3794                                                 | 4,23                                                                                                      | 14,593                                                                             | 3,6                                                       |
| CuH             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 1,463                                                            | 1941,3                                                                     | 37,5                                                          | 7,944                                                  | 256                                                                                                       | 0,9919                                                                             | 2,3                                                       |
| CuI             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,338                                                            | 264                                                                        | 0,6                                                           | 0,0733                                                 | 0,284                                                                                                     | 42,069                                                                             | 2,4                                                       |
| CuO             | $X\ ^2\Pi_{3/2}$               | 1,724                                                            | 640,2                                                                      | 4,4                                                           | 0,4445                                                 | 4,6                                                                                                       | 12,753                                                                             | 2,3                                                       |
| CuS             | $X\ ^2\Pi_{3/2}$               | 2,054*                                                           | 414                                                                        | 1,7                                                           | 0,1884*                                                | 1,1                                                                                                       | 21,201                                                                             | 2,3                                                       |
| F <sub>2</sub>  | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 1,412                                                            | 916,6                                                                      | 11,24                                                         | 0,8902                                                 | 13,85                                                                                                     | 9,4992                                                                             | 1,292                                                     |
| GaBr            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,352                                                            | 263,0                                                                      | 0,81                                                          | 0,0818                                                 | 0,32                                                                                                      | 37,221                                                                             | 3,5                                                       |
| GaCl            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,202                                                            | 365,3                                                                      | 1,2                                                           | 0,1499                                                 | 0,794                                                                                                     | 23,199                                                                             | 3,97                                                      |
| GaF             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 1,774                                                            | 622,2                                                                      | 3,2                                                           | 0,3595                                                 | 2,86                                                                                                      | 14,893                                                                             | 4,8                                                       |
| GaH             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 1,66                                                             | 1604,5                                                                     | 28,8                                                          | 6,137                                                  | 181                                                                                                       | 0,9933                                                                             | 2,3                                                       |
| GaI             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,575                                                            | 216,6                                                                      | 0,5                                                           | 0,0569                                                 | 0,19                                                                                                      | 44,666                                                                             | 2,8                                                       |
| Ge <sub>2</sub> | $X\ ^3\Sigma_g^-$              | 2,44                                                             | 274                                                                        | —                                                             | 0,078                                                  | —                                                                                                         | 36,454                                                                             | 2,3                                                       |
| GeF             | $X\ ^2\Pi_{1/2}$               | 1,745                                                            | 665,7                                                                      | 3,15                                                          | 0,3658                                                 | 2,67                                                                                                      | 15,114                                                                             | 4,0                                                       |
| GeH             | $X\ ^2\Pi_r$                   | 1,588                                                            | 1833,8*                                                                    | 40                                                            | 6,726                                                  | 192                                                                                                       | 0,9939                                                                             | 2,6                                                       |
| GeO             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 1,625                                                            | 986,49                                                                     | 4,47                                                          | 0,4857                                                 | 3,08                                                                                                      | 13,150                                                                             | 5,5                                                       |
| GeS             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,012                                                            | 576                                                                        | 1,8                                                           | 0,1866                                                 | 0,749                                                                                                     | 22,319                                                                             | 4,58                                                      |
| GeSe            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,135                                                            | 409                                                                        | 1,4                                                           | 0,0963                                                 | 0,289                                                                                                     | 38,401                                                                             | 4,0                                                       |
| GeTe            | $X\ ^1\Sigma^+$                | 2,340                                                            | 324                                                                        | 0,7                                                           | 0,0653                                                 | 0,172                                                                                                     | 47,113                                                                             | 3,4                                                       |
| H <sub>2</sub>  | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 0,7414                                                           | 4401,21                                                                    | 121,34                                                        | 60,85                                                  | 3062                                                                                                      | 0,5039                                                                             | 3,6118                                                    |
| HD              | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 0,7414                                                           | 3813,1                                                                     | 91,6                                                          | 45,65                                                  | 1990                                                                                                      | 0,6717                                                                             | 3,6406                                                    |
| HT              | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 0,7414                                                           | 3597,0                                                                     | 81,68                                                         | 40,60                                                  | 1664                                                                                                      | 0,7554                                                                             | 3,6512                                                    |
| D <sub>2</sub>  | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 0,7415                                                           | 3115,5                                                                     | 61,8                                                          | 30,44                                                  | 1079                                                                                                      | 1,0071                                                                             | 3,6748                                                    |
| DT              | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 0,7414                                                           | 2845,5                                                                     | 51,4                                                          | 25,40                                                  | 822                                                                                                       | 1,2076                                                                             | 3,6881                                                    |
| T <sub>2</sub>  | $X\ ^1\Sigma_g^+$              | 0,7414                                                           | 2546,5                                                                     | 41,2                                                          | 20,33                                                  | 589                                                                                                       | 1,5080                                                                             | 3,7028                                                    |
| HBr             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 1,4144                                                           | 2649,0                                                                     | 45,22                                                         | 8,4649                                                 | 233                                                                                                       | 0,9954                                                                             | 3,03                                                      |
| HCl             | $X\ ^1\Sigma^+$                | 1,2746                                                           | 2990,95                                                                    | 52,82                                                         | 10,593                                                 | 307,2                                                                                                     | 0,9796                                                                             | 3,576                                                     |
| HF              | $X\ ^1\Sigma^+$                | 0,9168                                                           | 4138,3                                                                     | 89,9                                                          | 20,96                                                  | 798                                                                                                       | 0,9571                                                                             | 4,73                                                      |

| Молекула        | Терм<br>основного<br>состояния | Равновесное<br>межъядерное<br>расстояние<br>$r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота гар-<br>монических<br>колебаний $\omega_e$ ,<br>$\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>ангармонизма<br>$\omega_e x_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Вращательная<br>постоянная<br>$B_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>колебательно-<br>вращательного<br>взаимодейст-<br>вия $\alpha_e$ , $10^{-3}\text{см}^{-1}$ | Приведенная<br>масса для<br>доминантного<br>изотопного<br>состава $\mu_d$ ,<br>а. е. м. | Энергия<br>диссоциации<br>$D_0$ , $10^4 \text{ см}^{-1}$ |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| HI              | $X^1\Sigma^+$                  | 1,6092                                                           | 2309,01                                                                  | 39,64                                                           | 6,4264*                                                | 169                                                                                                      | 0,9999                                                                                  | 2,463                                                    |
| HfO             | $X^1\Sigma$                    | 1,723                                                            | 974,1                                                                    | 3,23                                                            | 0,3865                                                 | 1,72                                                                                                     | 14,689                                                                                  | 6,6                                                      |
| Hg <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 2,92                                                             | 44                                                                       | 0,5                                                             | 0,02                                                   | —                                                                                                        | 100,48                                                                                  | 0,089                                                    |
| HgCl            | $X^2\Sigma$                    | 2,395                                                            | 292,6                                                                    | 1,63                                                            | 0,098                                                  | 0,5                                                                                                      | 29,808                                                                                  | 0,863                                                    |
| HgH             | $X^2\Sigma$                    | 1,766*                                                           | 1203,2*                                                                  | 120                                                             | 5,389*                                                 | —                                                                                                        | 1,0028                                                                                  | 0,3020                                                   |
| HoF             | $X$                            | 1,940                                                            | 615,3                                                                    | 2,60                                                            | 0,2630                                                 | 1,4                                                                                                      | 17,036                                                                                  | 4,5                                                      |
| I <sub>2</sub>  | $X^1\Sigma_g^+$                | 2,666                                                            | 214,52                                                                   | 0,609                                                           | 0,0374                                                 | 0,114                                                                                                    | 63,452                                                                                  | 1,2333                                                   |
| IBr             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,469                                                            | 268,6                                                                    | 0,814                                                           | 0,0568                                                 | 0,197                                                                                                    | 48,659                                                                                  | 1,466                                                    |
| ICl             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,321                                                            | 384,32                                                                   | 1,51                                                            | 0,1142                                                 | 0,53                                                                                                     | 27,415                                                                                  | 1,7366                                                   |
| IF              | $X^1\Sigma^+$                  | 1,910                                                            | 610,2                                                                    | 3,12                                                            | 0,2797                                                 | 1,87                                                                                                     | 16,525                                                                                  | 2,32                                                     |
| IO              | $X^2\Pi_{3/2}$                 | 1,868                                                            | 681,5                                                                    | 4,3                                                             | 0,3403                                                 | 2,70                                                                                                     | 14,205                                                                                  | 1,8                                                      |
| InBr            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,543                                                            | 221                                                                      | 0,65                                                            | 0,0549                                                 | 0,19                                                                                                     | 47,480                                                                                  | 3,2                                                      |
| InCl            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,401                                                            | 317                                                                      | 1,0                                                             | 0,1091                                                 | 0,518                                                                                                    | 26,810                                                                                  | 3,6                                                      |
| InF             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,985                                                            | 535,3                                                                    | 2,6                                                             | 0,2623                                                 | 1,88                                                                                                     | 16,303                                                                                  | 4,2                                                      |
| InH             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,838                                                            | 1476,0                                                                   | 25,6                                                            | 4,994                                                  | 143                                                                                                      | 0,9991                                                                                  | 2,0                                                      |
| InI             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,754                                                            | 177,08                                                                   | 0,343                                                           | 0,03687                                                | 0,104                                                                                                    | 60,303                                                                                  | 2,8                                                      |
| K <sub>2</sub>  | $X^1\Sigma_g^+$                | 3,925                                                            | 92,405                                                                   | 0,328                                                           | 0,0562                                                 | 0,212                                                                                                    | 19,482                                                                                  | 0,415                                                    |
| KBr             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,821                                                            | 213                                                                      | 0,8                                                             | 0,0812                                                 | 0,40                                                                                                     | 26,085                                                                                  | 3,2                                                      |
| KCl             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,667                                                            | 281                                                                      | 1,3                                                             | 0,1286                                                 | 0,790                                                                                                    | 18,429                                                                                  | 3,5                                                      |
| KF              | $X^1\Sigma^+$                  | 2,171                                                            | 428                                                                      | 2,4                                                             | 0,280                                                  | 2,34                                                                                                     | 12,771                                                                                  | 4,1                                                      |
| KH              | $X^1\Sigma^+$                  | 2,240                                                            | 986,65                                                                   | 15,84                                                           | 3,419                                                  | 94                                                                                                       | 0,9824                                                                                  | 1,429                                                    |
| KI              | $X^1\Sigma^+$                  | 3,048                                                            | 186,5                                                                    | 0,574                                                           | 0,0609                                                 | 0,268                                                                                                    | 29,811                                                                                  | 2,7                                                      |
| Kr <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 4,0                                                              | 24,2                                                                     | 1,3                                                             | 0,025                                                  | 1,0                                                                                                      | 41,956                                                                                  | 0,0127                                                   |
| LaF             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,026*                                                           | 570*                                                                     | —                                                               | 0,2456*                                                | —                                                                                                        | 16,713                                                                                  | 5,0                                                      |
| LaO             | $X^2\Sigma^+$                  | 1,826                                                            | 812,7*                                                                   | 2,2                                                             | 0,353                                                  | 1,4                                                                                                      | 14,343                                                                                  | 6,6                                                      |
| LaS             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,355*                                                           | 456,7                                                                    | 0,96                                                            | 0,1169*                                                | 0,3                                                                                                      | 25,990                                                                                  | 4,8                                                      |
| Li <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 2,673                                                            | 351,43                                                                   | 2,595                                                           | 0,6726                                                 | 7,04                                                                                                     | 3,5080                                                                                  | 0,8342                                                   |
| LiBr            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,170                                                            | 563,2                                                                    | 3,5                                                             | 0,5554                                                 | 5,64                                                                                                     | 6,4432                                                                                  | 3,5                                                      |
| LiCl            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,021                                                            | 643,3                                                                    | 4,50                                                            | 0,7065                                                 | 8,01                                                                                                     | 5,8436                                                                                  | 3,9                                                      |
| LiF             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,564                                                            | 910,3                                                                    | 7,9                                                             | 1,345                                                  | 20,3                                                                                                     | 5,1238                                                                                  | 4,77                                                     |
| LiH             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,596                                                            | 1405,6                                                                   | 23,2                                                            | 7,513                                                  | 213                                                                                                      | 0,8812                                                                                  | 1,9589                                                   |
| LiI             | $X^1\Sigma^+ (O^+)$            | 2,392                                                            | 496,84                                                                   | 2,84                                                            | 0,4432                                                 | 4,10                                                                                                     | 6,6484                                                                                  | 2,86                                                     |
| LiNa            | $X^1\Sigma$                    | 2,81                                                             | 257                                                                      | 1,6                                                             | 0,396                                                  | 3,6                                                                                                      | 5,3755                                                                                  | 0,69                                                     |
| LiO             | $X^2\Pi_i$                     | 1,7                                                              | 850                                                                      | 12                                                              | 1,20                                                   | 15                                                                                                       | 4,8768                                                                                  | 2,8                                                      |
| LuF             | $X^1\Sigma$                    | 1,917                                                            | 611,8                                                                    | 2,5                                                             | 0,2676                                                 | 16                                                                                                       | 17,137                                                                                  | 4,8                                                      |
| LuH             | $X^1\Sigma$                    | 1,912                                                            | 1500                                                                     | 20                                                              | 4,602                                                  | 100                                                                                                      | 1,0021                                                                                  | —                                                        |
| LuO             | $X^2\Sigma^+$                  | 1,790                                                            | 842                                                                      | 3,1                                                             | 0,3588                                                 | 1,6                                                                                                      | 14,655                                                                                  | 5,8                                                      |
| Mg <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 3,889                                                            | 51,12                                                                    | 1,64                                                            | 0,0929                                                 | 3,78                                                                                                     | 11,993                                                                                  | 0,0404                                                   |
| MgBr            | $X^2\Sigma^+$                  | 2,36*                                                            | 374                                                                      | 1,3                                                             | 0,164*                                                 | —                                                                                                        | 18,395                                                                                  | 2,7                                                      |
| MgCa            | $X^1\Sigma^+$                  | 4,04                                                             | 60                                                                       | 2                                                               | 0,069                                                  | 2                                                                                                        | 14,989                                                                                  | 0,0662                                                   |

| Молекула        | Терм<br>основного<br>состояния         | Равновесное<br>межъядерное<br>расстояние<br>$r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота<br>гармониче-<br>ских колеба-<br>ний $\omega_e$ ,<br>$\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>ангармонизма<br>$\omega_e x_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Вращательная<br>постоянная<br>$B_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>колебательно-<br>вращательного<br>взаимодейст-<br>вия $\alpha_e$ ,<br>$10^{-8}$ $\text{см}^{-1}$ | Приведенная<br>масса для<br>доминантного<br>изотопного<br>состава $\mu_A$ ,<br>а. е. м. | Энергия<br>диссоциации<br>$D_0$ , $10^4$ $\text{см}^{-1}$ |
|-----------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| MgCl            | $X \ ^2\Sigma^+$                       | 2,199                                                            | 462,1*                                                                        | 2,1                                                             | 0,2450                                                 | 1,6                                                                                                            | 14,227                                                                                  | 2,7                                                       |
| MgF             | $X \ ^2\Sigma^+$                       | 1,750                                                            | 721,6                                                                         | 4,9                                                             | 0,5192                                                 | 4,7                                                                                                            | 10,601                                                                                  | 3,8                                                       |
| MgH             | $X \ ^2\Sigma^+$                       | 1,730                                                            | 1495,2                                                                        | 31,9                                                            | 5,826                                                  | 186                                                                                                            | 0,9672                                                                                  | 1,1                                                       |
| MgO             | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 1,7484                                                           | 784,8                                                                         | 5,3                                                             | 0,5747                                                 | 5,32                                                                                                           | 9,5958                                                                                  | 3,0                                                       |
| MgS             | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 2,142                                                            | 528,7                                                                         | 2,70                                                            | 0,2680                                                 | 1,8                                                                                                            | 13,704                                                                                  | 1,9                                                       |
| MnH             | $X \ ^7\Sigma$                         | 1,731                                                            | 1548                                                                          | 29                                                              | 5,684                                                  | 157                                                                                                            | 0,9897                                                                                  | 1,9                                                       |
| MnO             | $X \ ^6\Sigma$                         | 1,77                                                             | 840                                                                           | 4,8                                                             | 0,43                                                   | —                                                                                                              | 12,388                                                                                  | 3,0                                                       |
| MnS             | $X \ ^6\Sigma^+$                       | 2,066                                                            | 491,1                                                                         | 1,86                                                            | 0,1954                                                 | 0,96                                                                                                           | 20,210                                                                                  | 2,3                                                       |
| N <sub>2</sub>  | $X \ ^1\Sigma_g^+$                     | 1,0977                                                           | 2358,6                                                                        | 14,32                                                           | 1,998                                                  | 17,3                                                                                                           | 7,0015                                                                                  | 7,871                                                     |
| NBr             | $X \ ^3\Sigma^-$                       | 1,79                                                             | 692                                                                           | 4,72                                                            | 0,44                                                   | 4                                                                                                              | 11,893                                                                                  | 2,3                                                       |
| NCI             | $X \ ^3\Sigma^-$                       | 1,6108                                                           | 827,96                                                                        | 5,30                                                            | 0,6498                                                 | 6,41                                                                                                           | 9,9990                                                                                  | 3,2                                                       |
| NF              | $X \ ^3\Sigma^-$                       | 1,317                                                            | 1141,4                                                                        | 9,0                                                             | 1,206                                                  | 14,9                                                                                                           | 8,0613                                                                                  | 2,8                                                       |
| NH              | $X \ ^3\Sigma^-$                       | 1,0372                                                           | 3281                                                                          | 78,3                                                            | 16,667                                                 | 647,6                                                                                                          | 0,94016                                                                                 | 2,64                                                      |
| NO              | $X \ ^2\Pi_r \left(\frac{1}{2}\right)$ | 1,1508                                                           | 1904,20                                                                       | 14,07                                                           | 1,6720*                                                | 17                                                                                                             | 7,4664                                                                                  | 5,240                                                     |
| NS              | $X \ ^2\Pi_r \left(\frac{1}{2}\right)$ | 1,494                                                            | 1219                                                                          | 7,3                                                             | 0,7696*                                                | 6,3                                                                                                            | 9,7380                                                                                  | 4,0                                                       |
| NSe             | $X_1 \ ^2\Pi_{1/2}$                    | 1,652                                                            | 956,8                                                                         | 5,6                                                             | 0,518                                                  | 4                                                                                                              | 11,915                                                                                  | 3,1                                                       |
| Na <sub>2</sub> | $X \ ^1\Sigma_g^+$                     | 3,079                                                            | 159,12                                                                        | 0,725                                                           | 0,1547                                                 | 0,874                                                                                                          | 11,495                                                                                  | 0,5943                                                    |
| NaBr            | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 2,502                                                            | 302                                                                           | 1,5                                                             | 0,1513                                                 | 0,941                                                                                                          | 17,803                                                                                  | 3,0                                                       |
| NaCl            | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 2,361                                                            | 366                                                                           | 2,1                                                             | 0,2181                                                 | 1,625                                                                                                          | 13,871                                                                                  | 3,4                                                       |
| NaF             | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 1,926                                                            | 536                                                                           | 3,4                                                             | 0,4369                                                 | 4,559                                                                                                          | 10,402                                                                                  | 4,3                                                       |
| NaH             | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 1,889                                                            | 1176                                                                          | 21,2                                                            | 4,89                                                   | 131                                                                                                            | 0,9655                                                                                  | 1,57                                                      |
| NaI             | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 2,711                                                            | 258                                                                           | 1,1                                                             | 0,1178                                                 | 0,648                                                                                                          | 19,464                                                                                  | 2,4                                                       |
| NaK             | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 3,59                                                             | 124,13                                                                        | 0,511                                                           | 0,0905                                                 | 0,46                                                                                                           | 14,459                                                                                  | 0,520                                                     |
| NbO             | $X \ ^4\Sigma^-$                       | 1,691                                                            | 990                                                                           | 3,8                                                             | 0,432                                                  | 2                                                                                                              | 13,646                                                                                  | 6,3                                                       |
| Ne <sub>2</sub> | $X \ ^1\Sigma_g^+$                     | 3,1*                                                             | 14*                                                                           | —                                                               | 0,17*                                                  | 60                                                                                                             | 9,9962                                                                                  | $1,6 \cdot 10^{-3}$                                       |
| NiH             | $X_1 \ ^2\Delta_{5/2}$                 | 1,48                                                             | 1927*                                                                         | 40                                                              | 7,70*                                                  | 230                                                                                                            | 0,9906                                                                                  | 2,5                                                       |
| O <sub>2</sub>  | $X \ ^3\Sigma_g^-$                     | 1,208                                                            | 1580,2                                                                        | 12,0                                                            | 1,446                                                  | 15,9                                                                                                           | 7,99746                                                                                 | 4,126                                                     |
| OH              | $X \ ^2\Pi_i \left(\frac{3}{2}\right)$ | 0,970                                                            | 3737,8                                                                        | 84,9                                                            | 18,91                                                  | 0,724                                                                                                          | 0,9481                                                                                  | 3,54                                                      |
| P <sub>2</sub>  | $X \ ^1\Sigma_g^+$                     | 1,893                                                            | 780,8                                                                         | 2,83                                                            | 0,3036                                                 | 1,5                                                                                                            | 15,487                                                                                  | 4,06                                                      |
| PBr             | $X \ ^3\Sigma^-(O^+)$                  | 2,171                                                            | 458,3                                                                         | 1,6                                                             | 0,1607                                                 | 0,69                                                                                                           | 22,244                                                                                  | 3,6                                                       |
| PCl             | $X \ ^3\Sigma^-$                       | 2,0146                                                           | 551,38                                                                        | 2,23                                                            | 0,2529                                                 | 1,51                                                                                                           | 16,4251                                                                                 | —                                                         |
| PF              | $X \ ^3\Sigma^-$                       | 1,590                                                            | 846,7                                                                         | 4,49                                                            | 0,567                                                  | 4,6                                                                                                            | 11,776                                                                                  | 3,7                                                       |
| PH              | $X \ ^3\Sigma^-$                       | 1,422                                                            | 2365                                                                          | 45                                                              | 8,537                                                  | 250                                                                                                            | 0,9761                                                                                  | 2,8                                                       |
| PN              | $X \ ^1\Sigma^+$                       | 1,491                                                            | 1337,0                                                                        | 6,9                                                             | 0,7865                                                 | 5,54                                                                                                           | 9,6434                                                                                  | 5,1                                                       |
| PO              | $X \ ^2\Pi_r$                          | 1,476                                                            | 1233,3                                                                        | 6,6                                                             | 0,734                                                  | 5                                                                                                              | 10,548                                                                                  | 4,92                                                      |
| PS              | $X \ ^2\Pi_r$                          | 1,901*                                                           | 739                                                                           | 3,0                                                             | 0,2963*                                                | —                                                                                                              | 15,733                                                                                  | 3,7                                                       |
| Pb <sub>2</sub> | $X \ ^3\Sigma_g^-(O_g^+)$              | 2,93                                                             | 110,1                                                                         | 0,32                                                            | 0,0189                                                 | 0,051                                                                                                          | 103,99                                                                                  | 0,66                                                      |
| PbCl            | $X_1 \ ^2\Pi_{1/2}$                    | 2,18*                                                            | 304                                                                           | 0,9                                                             | 0,119*                                                 | —                                                                                                              | 29,936                                                                                  | 2,5                                                       |

| Молекула        | Терм<br>основного<br>состояния | Равновесное<br>межъядерное<br>расстояние<br>$r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота<br>гармонических<br>колебаний<br>$\omega_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>ангармонизма<br>$\omega_e x_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Вращательная<br>постоянная<br>$B_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>колебательно-<br>вращательного<br>взаимодейст-<br>вия $\alpha_e$ ,<br>$10^{-3}$ $\text{см}^{-1}$ | Приведенная<br>масса для<br>доминантного<br>изотопного<br>состава $\mu_A$ ,<br>а. е. м. | Энергия<br>диссоциации<br>$D_0^\circ$ , $10^4$ $\text{см}^{-1}$ |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| PbF             | $X_1 \ ^2\Pi_{1/2}$            | 2,057                                                            | 507,3                                                                  | 2,3                                                             | 0,2287                                                 | 1,47                                                                                                           | 17,408                                                                                  | 2,9                                                             |
| PbH             | $X \ ^2\Pi_{1/2}$              | 1,839                                                            | 1564                                                                   | 29,8                                                            | 4,971                                                  | 144                                                                                                            | 1,0030                                                                                  | 1,3                                                             |
| PbO             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 1,922                                                            | 721                                                                    | 3,5                                                             | 0,3073                                                 | 1,91                                                                                                           | 14,853                                                                                  | 3,1                                                             |
| PbS             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,287                                                            | 429,4                                                                  | 1,3                                                             | 0,1163                                                 | 0,44                                                                                                           | 27,712                                                                                  | 2,83                                                            |
| PbSe            | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,402                                                            | 278                                                                    | 0,5                                                             | 0,0506                                                 | 0,13                                                                                                           | 57,732                                                                                  | 2,5                                                             |
| PbTe            | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,595                                                            | 212,0                                                                  | 0,4                                                             | 0,0313                                                 | 0,07                                                                                                           | 79,961                                                                                  | 2,1                                                             |
| PdD             | $X \ ^2\Sigma^+$               | 1,529                                                            | 1446,0                                                                 | 19,6                                                            | 3,649                                                  | 81                                                                                                             | 1,9772                                                                                  | —                                                               |
| PtC             | $X \ ^1\Sigma$                 | 1,677                                                            | 1051,1                                                                 | 4,9                                                             | 0,5304                                                 | 3,3                                                                                                            | 11,304                                                                                  | 5,1                                                             |
| PtH             | $X_1 \ ^2\Delta_{5/2}$         | 1,529                                                            | 2390                                                                   | 50                                                              | 7,196                                                  | 200                                                                                                            | 1,0026                                                                                  | 2,77                                                            |
| PtO             | $X \ ^1\Sigma$                 | 1,727                                                            | 851,1                                                                  | 5,0                                                             | 0,3822                                                 | 2,8                                                                                                            | 14,782                                                                                  | 3,1                                                             |
| Rb <sub>2</sub> | $X \ ^1\Sigma_g^+$             | 4,210                                                            | 57,78                                                                  | 0,139                                                           | 0,0224                                                 | 0,055                                                                                                          | 42,456                                                                                  | 0,393                                                           |
| RbBr            | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,945                                                            | 169,5                                                                  | 0,46                                                            | 0,0475                                                 | 0,186                                                                                                          | 40,903                                                                                  | 3,1                                                             |
| RbCl            | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,787                                                            | 230                                                                    | 0,9                                                             | 0,0876                                                 | 0,454                                                                                                          | 24,769                                                                                  | 3,5                                                             |
| RbF             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,270                                                            | 375                                                                    | 2                                                               | 0,2107                                                 | 1,52                                                                                                           | 15,525                                                                                  | 4,0                                                             |
| RbH             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,367                                                            | 937,2                                                                  | 14,17                                                           | 3,020                                                  | 73                                                                                                             | 0,9960                                                                                  | 1,5                                                             |
| RbI             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 3,177                                                            | 138,5                                                                  | 0,33                                                            | 0,0328                                                 | 0,109                                                                                                          | 50,873                                                                                  | 2,7                                                             |
| RhC             | $X \ ^2\Sigma$                 | 1,613                                                            | 1049,9                                                                 | 4,94                                                            | 0,603                                                  | 4,0                                                                                                            | 10,747                                                                                  | 4,85                                                            |
| S <sub>2</sub>  | $X \ ^3\Sigma_g^-$             | 1,8894                                                           | 725,6                                                                  | 2,84                                                            | 0,2954                                                 | 1,59                                                                                                           | 15,986                                                                                  | 3,524                                                           |
| SF              | $X_1 \ ^2\Pi_{3/2}$            | 1,596                                                            | 837,6                                                                  | 4,47                                                            | 0,5552                                                 | 4,46                                                                                                           | 11,917                                                                                  | 2,7                                                             |
| SH              | $X \ ^2\Pi_i$                  | 1,341                                                            | 2712                                                                   | 60                                                              | 9,461*                                                 | 270                                                                                                            | 0,9770                                                                                  | 2,9                                                             |
| SO              | $X \ ^3\Sigma^-$               | 1,481                                                            | 1149,2                                                                 | 5,6                                                             | 0,7208                                                 | 5,74                                                                                                           | 10,661                                                                                  | 4,322                                                           |
| Sb <sub>2</sub> | $X \ ^3\Sigma_g^-(O_g^+)$      | 2,35                                                             | 270,0                                                                  | 0,59                                                            | 0,0501                                                 | —                                                                                                              | 60,948                                                                                  | 2,5                                                             |
| SbF             | $X_1 \ ^3\Sigma^-(O^+)$        | 1,918                                                            | 610,2                                                                  | 2,6                                                             | 0,279                                                  | 2                                                                                                              | 16,418                                                                                  | 3,6                                                             |
| SbO             | $X \ ^2\Pi_r$                  | 1,826                                                            | 820                                                                    | 4                                                               | 0,358                                                  | 2                                                                                                              | 14,126                                                                                  | 3,2                                                             |
| SbP             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,21                                                             | 500,1                                                                  | 1,63                                                            | 0,141                                                  | 0,5                                                                                                            | 24,657                                                                                  | 2,97                                                            |
| ScCl            | $X \ ^1\Sigma^+$               | 2,23                                                             | 447                                                                    | 2                                                               | 0,173                                                  | 1                                                                                                              | 19,669                                                                                  | 2,7                                                             |
| ScF             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 1,788                                                            | 736                                                                    | 4                                                               | 0,395                                                  | 2,7                                                                                                            | 13,355                                                                                  | 5,0                                                             |
| ScO             | $X \ ^2\Sigma^+$               | 1,668*                                                           | 973,3                                                                  | 4,2                                                             | 0,5134*                                                | 3                                                                                                              | 11,797                                                                                  | 5,6                                                             |
| Se <sub>2</sub> | $X_1 \ ^3\Sigma_g^-(O_g^+)$    | 2,166                                                            | 385,37                                                                 | 0,98                                                            | 0,0899                                                 | 0,29                                                                                                           | 39,958                                                                                  | 2,751                                                           |
| SeH             | $X_1 \ ^2\Pi_{3/2}$            | 1,47*                                                            | 2400                                                                   | —                                                               | 7,8*                                                   | —                                                                                                              | 0,9953                                                                                  | 2,6                                                             |
| SeO             | $X_1 \ ^3\Sigma^-(O^+)$        | 1,648                                                            | 914,7                                                                  | 4,5                                                             | 0,465                                                  | 3,2                                                                                                            | 13,327                                                                                  | 3,56                                                            |
| SeS             | $X_1 \ ^3\Sigma^-(O^+)$        | 2,037                                                            | 555,6                                                                  | 1,85                                                            | 0,1793                                                 | 0,8                                                                                                            | 22,670                                                                                  | 3,0                                                             |
| Si <sub>2</sub> | $X \ ^3\Sigma_g^-$             | 2,25                                                             | 511,0                                                                  | 2,0                                                             | 0,239                                                  | 1,3                                                                                                            | 13,988                                                                                  | 2,6                                                             |
| SiBr            | $X \ ^2\Pi_r$                  | 2,26*                                                            | 424                                                                    | 1                                                               | 0,160*                                                 | —                                                                                                              | 20,655                                                                                  | 3,1                                                             |
| SiCl            | $X \ ^2\Pi_r$                  | 2,06                                                             | 535,6                                                                  | 2,17                                                            | 0,256                                                  | 1,6                                                                                                            | 15,542                                                                                  | 3,8                                                             |
| SiF             | $X \ ^2\Pi_r$                  | 1,601                                                            | 857,2                                                                  | 4,73                                                            | 0,5812                                                 | 4,9                                                                                                            | 11,315                                                                                  | 4,5                                                             |
| SiH             | $X \ ^2\Pi_r$                  | 1,520                                                            | 2042,52                                                                | 36,06                                                           | 7,5039                                                 | 218                                                                                                            | 0,9728                                                                                  | 2,47                                                            |
| SiI             | $X_1 \ ^2\Pi_{1/2}$            | 2,4                                                              | 364                                                                    | 1,2                                                             | 0,12*                                                  | —                                                                                                              | 22,923                                                                                  | 2,4                                                             |
| SiN             | $X \ ^2\Sigma^+$               | 1,572                                                            | 1151,4                                                                 | 6,5                                                             | 0,731                                                  | 5,6                                                                                                            | 9,3321                                                                                  | 4,2                                                             |
| SiO             | $X \ ^1\Sigma^+$               | 1,510                                                            | 1241,56                                                                | 6,0                                                             | 0,7268                                                 | 5,04                                                                                                           | 10,177                                                                                  | 6,66                                                            |

| Молекула        | Терм<br>основного<br>состояния | Равновесное<br>межъядерное<br>расстояние<br>$r_e$ , $10^{-10}$ м | Частота<br>гармониче-<br>ских колеба-<br>ний $\omega_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>ангармонизма<br>$\omega_e^2 x_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Вращательная<br>постоянная<br>$B_e$ , $\text{см}^{-1}$ | Постоянная<br>колебательно-<br>вращательного<br>взаимодейст-<br>вия $\omega_e^2 y_e$ ,<br>$10^{-8} \text{ см}^{-1}$ | Приведенная<br>масса для<br>доминантного<br>изотопного<br>состава $\mu_A$ ,<br>а. е. м. | Энергия<br>диссоциации<br>$D_0$ , $10^4 \text{ см}^{-1}$ |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| SiS             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,929                                                            | 749,5                                                                      | 2,57                                                              | 0,3035                                                 | 1,44                                                                                                                | 14,921                                                                                  | 5,2                                                      |
| SiSe            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,058                                                            | 580                                                                        | 1,8                                                               | 0,1920                                                 | 0,78                                                                                                                | 20,722                                                                                  | 4,5                                                      |
| Sn <sub>2</sub> | $X^3\Sigma_g^-(O_g^+)$         | 2,75                                                             | 189,7                                                                      | 0,5                                                               | 0,0385                                                 | 0,1                                                                                                                 | 59,447                                                                                  | 1,68                                                     |
| SnCl            | $X_1^2\Pi_{1/2}$               | 2,36                                                             | 351                                                                        | 1,1                                                               | 0,112                                                  | 0,4                                                                                                                 | 27,073                                                                                  | 3,5                                                      |
| SnF             | $X^2\Pi_{1/2}$                 | 1,94                                                             | 583                                                                        | 2,7                                                               | 0,273                                                  | 1,4                                                                                                                 | 16,362                                                                                  | 4,0                                                      |
| SnO             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,833                                                            | 822                                                                        | 3,7                                                               | 0,3557                                                 | 2,14                                                                                                                | 14,112                                                                                  | 4,41                                                     |
| SnS             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,209                                                            | 487,3                                                                      | 1,36                                                              | 0,1369                                                 | 0,506                                                                                                               | 25,241                                                                                  | 3,8                                                      |
| SnSe            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,326                                                            | 331                                                                        | 0,74                                                              | 0,0650                                                 | 0,17                                                                                                                | 47,954                                                                                  | 3,4                                                      |
| SnTe            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,523                                                            | 259                                                                        | 0,5                                                               | 0,0425                                                 | 0,10                                                                                                                | 62,352                                                                                  | 3,0                                                      |
| Sr <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 4,5                                                              | 83                                                                         | —                                                                 | 0,019                                                  | —                                                                                                                   | 43,953                                                                                  | 0,10                                                     |
| SrBr            | $X^2\Sigma^+$                  | 2,735                                                            | 216,6                                                                      | 0,52                                                              | 0,05418                                                | 0,183                                                                                                               | 41,585                                                                                  | 2,75                                                     |
| SrCl            | $X^2\Sigma^+$                  | 2,576                                                            | 302,6                                                                      | 0,97                                                              | 0,10156                                                | 0,452                                                                                                               | 25,017                                                                                  | 3,4                                                      |
| SrF             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,075                                                            | 502                                                                        | 2,3                                                               | 0,2505                                                 | 1,55                                                                                                                | 15,622                                                                                  | 4,5                                                      |
| SrH             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,146                                                            | 1207,04                                                                    | 17,11                                                             | 3,6735                                                 | 80,2                                                                                                                | 0,9964                                                                                  | 1,3                                                      |
| SrI             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,974                                                            | 173,8                                                                      | 0,35                                                              | 0,0367                                                 | 0,106                                                                                                               | 51,932                                                                                  | 2,3                                                      |
| SrO             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,920                                                            | 653,5                                                                      | 4,0                                                               | 0,3380                                                 | 2,2                                                                                                                 | 13,533                                                                                  | 3,9                                                      |
| SrS             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,440                                                            | 388,4                                                                      | 1,3                                                               | 0,1207                                                 | 0,44                                                                                                                | 23,445                                                                                  | 2,8                                                      |
| TaO             | $X_1^2\Delta_{3/2}$            | 1,687                                                            | 1028,7                                                                     | 3,5                                                               | 0,4028                                                 | 1,8                                                                                                                 | 14,696                                                                                  | 6,6                                                      |
| Te <sub>2</sub> | $X_1^3\Sigma_g^-(O_g^+)$       | 2,558                                                            | 247,07                                                                     | 0,522                                                             | 0,03967                                                | 0,099                                                                                                               | 64,953                                                                                  | 2,159                                                    |
| TeO             | $X_1 O^+$                      | 1,825                                                            | 797,1                                                                      | 4,0                                                               | 0,355                                                  | 2,4                                                                                                                 | 14,241                                                                                  | 3,1                                                      |
| TeS             | $X_1 O^+$                      | 2,230                                                            | 471,2                                                                      | 1,6                                                               | 0,1322                                                 | 0,5                                                                                                                 | 25,657                                                                                  | 2,8                                                      |
| TeSe            | $X_1 O^+$                      | 2,37                                                             | 316,2                                                                      | 0,74                                                              | 0,062                                                  | 0,2                                                                                                                 | 48,420                                                                                  | 2,4                                                      |
| ThO             | $X^1\Sigma$                    | 1,840                                                            | 895,8                                                                      | 2,4                                                               | 0,3326                                                 | 1,3                                                                                                                 | 14,963                                                                                  | 7,2                                                      |
| TiO             | $X^3\Delta_r$                  | 1,620                                                            | 1009,0                                                                     | 4,50                                                              | 0,5354                                                 | 3,0                                                                                                                 | 11,994                                                                                  | 5,5                                                      |
| TiS             | $X^3\Delta(1)$                 | 2,083                                                            | 558,4*                                                                     | 1,9                                                               | 0,2018                                                 | 0,9                                                                                                                 | 19,182                                                                                  | 3,8                                                      |
| TiBr            | $X^1\Sigma^+$                  | 2,618                                                            | 192,1                                                                      | 0,4                                                               | 0,0424                                                 | 0,13                                                                                                                | 58,014                                                                                  | 2,76                                                     |
| TiCl            | $X^1\Sigma^+(O^+)$             | 2,485                                                            | 284,7                                                                      | 0,88                                                              | 0,0914                                                 | 0,40                                                                                                                | 29,873                                                                                  | 3,08                                                     |
| TiF             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,084                                                            | 477                                                                        | 2                                                                 | 0,22315                                                | 1,50                                                                                                                | 17,387                                                                                  | 3,69                                                     |
| TiH             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,87                                                             | 1391                                                                       | 23                                                                | 4,81                                                   | 0,15                                                                                                                | 1,0029                                                                                  | 1,6                                                      |
| TiI             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,814                                                            | 143*                                                                       | —                                                                 | 0,0272                                                 | 0,07                                                                                                                | 78,379                                                                                  | 2,32                                                     |
| VO              | $X^4\Sigma^-$                  | 1,589                                                            | 1011                                                                       | 4,9                                                               | 0,5482                                                 | 3,5                                                                                                                 | 12,173                                                                                  | 5,2                                                      |
| Xe <sub>2</sub> | $X^1\Sigma_g^+$                | 4,36                                                             | 21,1                                                                       | 0,6                                                               | 0,014                                                  | —                                                                                                                   | 65,194                                                                                  | 0,0186                                                   |
| XeCl            | $X^2\Sigma^+$                  | 3,2                                                              | 26                                                                         | —0,3                                                              | 0,060                                                  | —                                                                                                                   | 27,641                                                                                  | 0,024                                                    |
| YCl             | $X^1\Sigma^+$                  | 2,41                                                             | 381                                                                        | 1                                                                 | 0,116                                                  | 0,3                                                                                                                 | 25,097                                                                                  | 2,8                                                      |
| YF              | $X^1\Sigma^+$                  | 1,926                                                            | 636,3                                                                      | 2,5                                                               | 0,2904                                                 | 1,6                                                                                                                 | 15,653                                                                                  | 5,0                                                      |
| YO              | $X^2\Sigma^+$                  | 1,788                                                            | 861,46                                                                     | 2,87                                                              | 0,3889                                                 | 1,72                                                                                                                | 13,556                                                                                  | 5,9                                                      |
| YbF             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,016                                                            | 501,9*                                                                     | 2,2                                                               | 0,2414*                                                | 1                                                                                                                   | 17,128                                                                                  | 4,0                                                      |
| YbH             | $X^2\Sigma^+$                  | 2,053                                                            | 1249,5                                                                     | 21,1                                                              | 3,993                                                  | 96                                                                                                                  | 1,0020                                                                                  | 1,5                                                      |
| ZnH             | $X^2\Sigma^+$                  | 1,595                                                            | 1608                                                                       | 55                                                                | 6,679                                                  | 250                                                                                                                 | 0,9922                                                                                  | 0,69                                                     |
| ZrO             | $X^1\Sigma^+$                  | 1,712                                                            | 969,8*                                                                     | 4,9                                                               | 0,4226*                                                | 2                                                                                                                   | 13,579                                                                                  | 6,3                                                      |

В табл. 32.5 собраны данные о спектроскопических постоянных основных состояний двухатомных молекул с указанием в отдельной графе символа электронного состояния, параметров колебательно-вращательного состояния  $\omega_e$ ,  $\omega_e x_e$ ,  $B_e$  и  $a_e$ , значений приведенной массы молекулы  $\mu_A = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$  для доминантного изотопного состава элементов, а также энергии диссоциации  $D_0$ , отвечающей разрыву связи молекулы в основном колебательном состоянии.\* Кроме того, на рис.

\* Звездочкой в табл. 32.5 в графах для  $r_e$ ,  $\omega_e$  и  $B_e$  обозначены, соответственно, значения  $r_0$ ,  $\Delta G_{1/2}$  и  $B_0$ .

32.44—32.48 представлена более детальная информация о ходе электронных термов для небольшого числа хорошо исследованных двухатомных систем —  $H_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $NO$  и  $O_2$ .

При отборе материала для табл. 32.5 мы использовали таблицы спектроскопических постоянных двухатомных молекул [3, 14] и многочисленные журнальные публикации последнего времени. Погрешности в определении числовых значений величин были учтены при округлении значащих цифр в пределах  $\pm 1$  для последней приведенной цифры. Оцениваемые погрешности определения электронных термов двухатомных молекул и ионов указаны непосредственно на рис. 32.44—32.48.

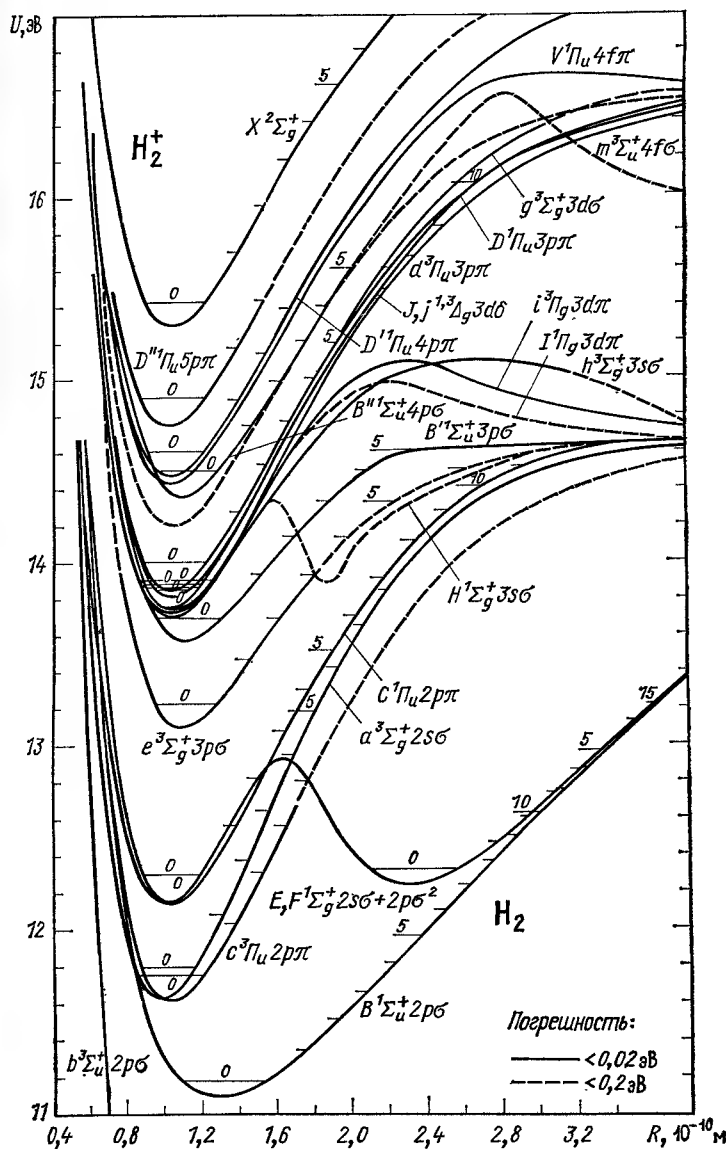


Рис. 32.44. Электронные термы молекул  $H_2$  и  $H_2^+$  [15]

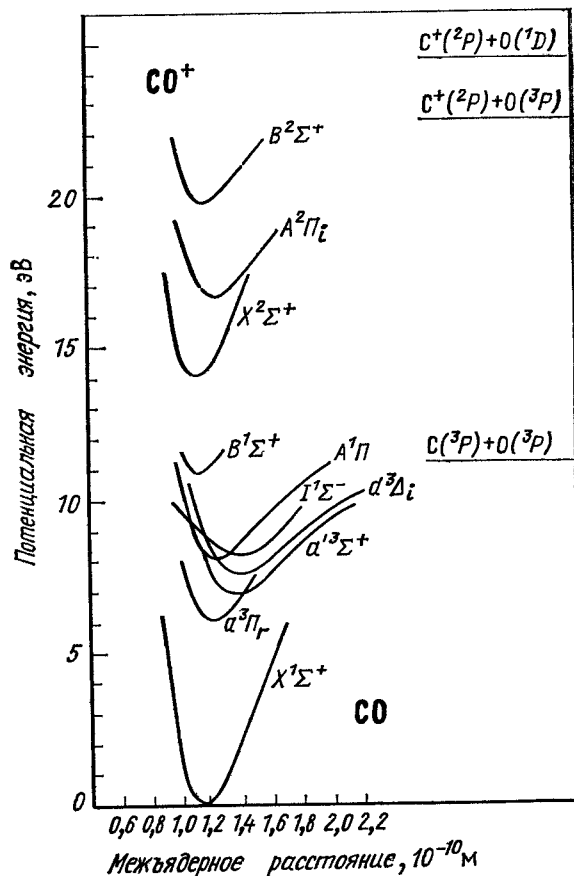


Рис. 32.45. Электронные термы молекул  $CO$  и  $CO^+$  [3, 16]



Рис. 32.47. Электронные термы молекул NO, NO<sup>+</sup> и NO<sup>-</sup> [3, 18]

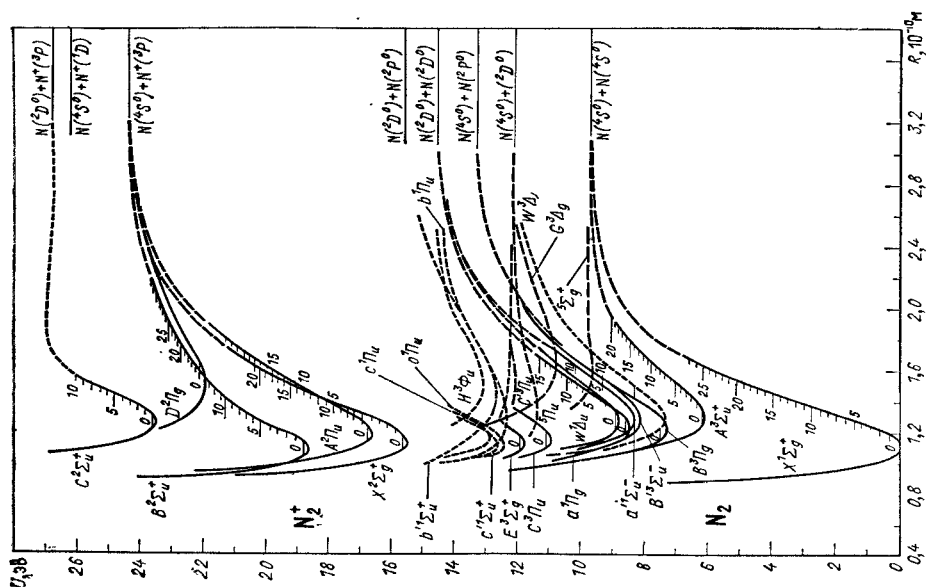


Рис. 32.46. Электронные термы молекул  $N_2$  и  $N_2^+$  [17]



# ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО-, ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

М. Е. Бродов, В. П. Яновский

## 33.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Под действием электромагнитного излучения в материальной среде возникает дипольный момент, атомы среды поляризуются. При малых напряженностях электрического поля излучения  $E$  индуцированная поляризация (или электрический дипольный момент единицы объема вещества) связана с  $E$  линейной зависимостью

$$P = \chi^{(1)} E,$$

где  $\chi^{(1)}$  — линейная оптическая восприимчивость вещества. Линейная поляризация обуславливает существование таких известных оптических явлений, как отражение и преломление света. Линейная восприимчивость связана с показателем преломления соотношением

$$\chi^{(1)} = n^2 - 1.$$

Для больших напряженностей светового поля, таких, которые развиваются в пучках мощных лазеров, наведенная поляризация может быть представлена в виде ряда по степеням напряженности  $E$  [1]

$$P = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots,$$

где  $\chi^{(2)}$ ,  $\chi^{(3)}$  и т. д. — нелинейные восприимчивости вещества, связанные с разнообразными нелинейными оптическими эффектами.

В общем случае в разложении поляризации по степеням поля необходимо учитывать также низкочастотные поля. Большинство нелинейных эффектов связано с членами ряда, пропорциональными квадрату и кубу амплитуды электрического поля. Квадратичная поляризация обуславливает существование таких эффектов, как генерация второй гармоники, оптическое выпрямление, линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) и параметрическая генерация. К эффектам, обязанным своим существованием поляризации, кубичной по полю, относятся генерация третьей гармоники, квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра), двухфотонное поглощение, вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна и вынужденное релеевское рассеяние.

## 33.2. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА)

Линейным электрооптическим эффектом (эффектом Поккельса) называют изменение показателя преломления вещества, пропорциональное приложенному электрическому полю.

Связь между изменениями поляризационных констант вещества  $\Delta B_{ij} = \Delta(1/\epsilon)_{ij}$  (где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость) и приложенным электрическим полем

$E_k$ , В/м, дается электрооптическими коэффициентами  $r_{ijk}$ , м/В:

$$\Delta B_{ij} = r_{ijk} E_k,$$

где  $i, j, k = 1, 2, 3$ . Коэффициенты  $r_{ijk}$  образуют поляризованный тензор третьего ранга, называемый тензором линейного электрооптического эффекта.

В сокращенной записи

$$\Delta B_l = r_{lk} E_k,$$

$l = (ij)$  и в зависимости от  $ij$  индекс  $l$  пробегает значения от 1 до 6:  $1 = (11)$ ,  $2 = (22)$ ,  $3 = (33)$ ,  $4 = (23)$ ,  $5 = (13)$ ,  $6 = (12)$ .

Ниже приведены тензоры электрооптических коэффициентов по сингониям в зависимости от типа точечной симметрии кристаллов (в скобках указано число независимых коэффициентов, отличных от нуля).

Триклинная  $1 - C_1$ :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \quad (18) \text{ элементов}$$

Моноклиная:

$$\begin{matrix} 2 - C_2 & m - C_s \\ \begin{pmatrix} 0 & r_{12} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 \\ r_{41} & 0 & r_{43} \\ 0 & r_{52} & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} \end{pmatrix} & 2 \parallel X_2 \\ \end{matrix} \quad (8) \quad \begin{matrix} m - C_s \\ \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} \\ r_{21} & 0 & r_{23} \\ r_{31} & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & r_{53} \\ 0 & r_{62} & 0 \end{pmatrix} & m \perp X_2 \\ \end{matrix} \quad (10)$$

Орторомбическая:

$$222 - D_2 \quad mm2 - C_{2v}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{52} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} \quad (3) \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Тетрагональная:

$$4 - C_4 \quad \bar{4} - S_4$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & -r_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & -r_{51} & 0 \\ r_{51} & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$422 - D_4 \quad 4mm - C_{4v}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1) \quad (3)$$

$$\bar{4}2m - D_{2d}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} \quad (2 \parallel X_1) \quad (2)$$

Тригональная:

$$3 - C_3 \quad 32 - D_3$$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & r_{13} \\ -r_{11} & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ -r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} \quad (6) \quad (2)$$

$$3m - C_{3v}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Гексагональная:

$$6 - C_6 \quad \bar{6} - C_{3h}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & 0 \\ -r_{11} & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} \quad (4) \quad (2)$$

622 —  $D_6$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

6mm —  $C_{6v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\bar{6}m2 - D_{3h}$

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (m \perp X_1) \quad (1)$$

Кубическая:

432 — 0

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad 0$$

23 и  $\bar{4}3m - T$  и  $Td$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Линейный электрооптический эффект существует лишь в кристаллах, не имеющих центра инверсии. Центр инверсии отсутствует у 21 точечной группы, для которых электрооптический тензор имеет отличающиеся от нуля составляющие.

Значения электрооптических коэффициентов для различных типов кристаллов приведены в табл. 33.1—33.4. Если частота электрического поля, при которой произведены измерения, намного выше или ниже частоты собственного акустического резонанса, то использованы соответственно обозначения  $(S)$  и  $r_{ijk}^S$  или  $(T)$  и  $r_{ijk}^T$ . Погрешность измеренных значений  $r_{ijk}$  около 15%. В сегнетоэлектриках и других материалах, имеющих фазовый переход, наблюдается сильная зависимость электрооптического коэффициента от температуры, если последняя близка к критической температуре  $T_{кр}$ . Зависимость  $r_{ijk}$  от длины волны света в области прозрачности веществ, как правило, слабая.

Одной из важных характеристик электрооптических кристаллов является полувольтное напряжение  $U_{\lambda/2}$ , т. е. напряжение, соответствующее набегу разности фаз, равной  $\pi$ , между двумя световыми волнами с взаимно перпендикулярными поляризациями. Эта величина может быть найдена из соотношения

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_3^3 r_{33} - n_1^3 r_{13}} = \frac{\lambda}{n_3^3 r_c},$$

где  $r_c = r_{33} - r_{13}(n_1^3/n_3^3)$ , м/В;  $\lambda$  — длина волны, м;  $U_{\lambda/2}$  — полувольтное напряжение, В, в частном случае одноосных кристаллов [ось  $z$  (или ось 3) — оптическая] и при распространении света в перпендикулярном оси  $z$  направлении.

Таблица 33.1. Электрооптические свойства кристаллов типа KDP и ADP  
Симметрия  $\bar{4}2m$  при температуре выше критической  $T_{\text{кр}}$  [2]

| Вещество                                  | $T_{\text{РД}}, \text{K}$ | $r_{63}, 10^{-12} \text{ м/В}$       | $r_{41}, 10^{-12} \text{ м/В}$ | $\epsilon_s$     | $\epsilon_i$ |
|-------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------|
| $\text{KH}_2\text{PO}_4$ (KDP)            | 123                       | (T) 9,37<br>(S) 8,15 $r_{63} < 0$    | +8,6<br>$r_{41} < 0$           | (T) 21<br>(S) 21 | 42<br>44     |
| $\text{KD}_2\text{PO}_4$ (DKDP)           | 222                       | (T) 26,4<br>(S) 24,0 $0,93 r_{63}^T$ | 8,8<br>—                       | (T) 50<br>(S) 48 | —<br>58      |
| $\text{KH}_2\text{AsO}_4$ (KDA)           | 97                        | (T) 10,9<br>—                        | 12,5<br>—                      | (T) 21<br>(S) 19 | 54<br>53     |
| $\text{KD}_2\text{AsO}_4$ (DKDA)          | 162                       | (T) 18,2<br>(T) 15,5                 | —<br>—                         | —<br>—           | —<br>—       |
| $\text{RbH}_2\text{PO}_4$ (RDP)           | 147                       | (S) 0,91 $r_{63}^T$<br>(T) 13,0      | —<br>—                         | —<br>(T) 27      | —<br>41      |
| $\text{RbH}_2\text{AsO}_4$ (RDA)          | 110                       | —<br>(T) 21,4                        | —<br>—                         | (S) 24<br>—      | 39<br>—      |
| $\text{RbD}_2\text{AsO}_4$ (DRDA)         | 178                       | (T) 18,6<br>(T) 36,6                 | —<br>—                         | —<br>—           | —<br>—       |
| $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$ (CDA)          | 143                       | (T) —8,5<br>(S) 4,1                  | 23,1<br>$r_{41} < 0$           | (T) 15<br>(S) 14 | 56<br>58     |
| $\text{CsD}_2\text{AsO}_4$ (DCDA)         | 148*1                     | (T) 11,9<br>(T) 9,2                  | —<br>—                         | —<br>—           | —<br>—       |
| $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP)  | 242*1                     |                                      |                                |                  |              |
| $\text{ND}_4\text{D}_2\text{PO}_4$ (DADP) |                           |                                      |                                |                  |              |
| $\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$ (ADA) |                           |                                      |                                |                  |              |

\*<sup>1</sup> Антиферроэлектрический переход.

Таблица 33.2. Электрооптические свойства кристаллов типа  $ABO_3$  [2][illegible]

| Вещество ( $T_{\text{кр}}$ , К)               | Симметрия         | $r_{13}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                                                                   | $r_{lk}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                       | $\lambda$ , мкм                                             | $\epsilon_i$                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ (433)  | 4mm<br>или 4<br>6 | (T) $r_c = 130$                                                                                                                             | —                                                                                               | 0,633                                                       | (T) $\epsilon_3 = 1000$                                                                                                                                     |
| $\text{LiIO}_3$ (пироэлектр.)                 |                   | (S) $r_{33} = +6,4$<br>(S) $r_{13} = +4,1$                                                                                                  | (S) $r_{41} = 1,4$<br>(S) $r_{61} = +3,3$                                                       | 0,633<br>0,633                                              | (T) $\epsilon_1 = 1200$<br>(T) $\epsilon_3 = 554$<br>(T) $\epsilon_1 = 65$<br>(S) $\epsilon_3 = 6,5$<br>(S) $\epsilon_1 = 8$                                |
| $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (833) |                   | (T) $r_c = 34$<br>(T) $r_{33} = 48$<br>(T) $r_{13} = 15$<br>(T) $r_{23} = 13$<br>(S) $r_{33} = +29$<br>(S) $r_{23} = 8$<br>(S) $r_{13} = 7$ | (T) $r_{42} = 92$<br>(T) $r_{51} = 90$<br>—<br>(S) $r_{42} = 75$<br>(S) $r_{51} = 88$<br>—<br>— | 0,633<br>0,633<br>0,633<br>0,633<br>0,633<br>0,633<br>0,633 | (T) $\epsilon_1 = 235$<br>(T) $\epsilon_2 = 247$<br>(T) $\epsilon_3 = 51$<br>(S) $\epsilon_1 = 222$<br>(S) $\epsilon_2 = 227$<br>(S) $\epsilon_3 = 32$<br>— |

Таблица 33.3. Электрооптические свойства кристаллов типа АВ [2]

| Вещество      | Симметрия   | $r_{lk}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                          | $\lambda$ , мкм                          | $\epsilon_i$                                                                                                   |
|---------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{CuCl}$ | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 3,6$<br>(T) $r_{41} = 3,2$<br>(S) $r_{41} = +2,35$<br>(S) $r_{41} = +2,20$           | 0,633<br>10,6<br>0,633<br>3,39           | (S) $\epsilon = 7,5$<br>—<br>—<br>—                                                                            |
| $\text{CuBr}$ | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 0,85$                                                                                | 0,525                                    | —                                                                                                              |
| $\text{ZnO}$  | 6mm         | (S) $r_{33} = +2,6$<br>(S) $r_{13} = -1,4$<br>(S) $r_{33} = +1,9$<br>(S) $r_{13} = +0,96$          | 0,633<br>0,633<br>3,39<br>3,39           | (S) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 8,15$<br>$\approx \epsilon_3$<br>—<br>—                                         |
| $\text{ZnS}$  | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 1,2$<br>(T) $r_{41} = 2,1$<br>(S) $r_{41} = 1,6$<br>(S) $r_{41} = 1,4$               | 0,4<br>0,65<br>0,633<br>3,39             | (T) $\epsilon = 16$<br>(S) $\epsilon = 12,5$<br>(T, S) $\epsilon = 8,3$<br>—                                   |
| $\text{CdS}$  | 6mm         | (T) $r_c = 4$<br>(T) $r_{51} = 3,7$<br>(T) $r_c = 5,5$<br>(S) $r_{33} = 2,4$<br>(S) $r_{13} = 1,1$ | 0,589<br>0,589<br>10,6<br>0,633<br>0,633 | (T) $\epsilon_3 = 10,33$<br>(T) $\epsilon_1 = 9,35$<br>(S) $\epsilon_1 = 9,02$<br>(S) $\epsilon_3 = 9,53$<br>— |
| $\text{CdSe}$ | 6mm         | (S) $r_{33} = 4,3$<br>(S) $r_{13} = 1,8$                                                           | 3,39<br>3,39                             | (T) $\epsilon_3 = 10,65$<br>(T) $\epsilon_1 = 9,70$<br>(S) $\epsilon_1 = 9,33$<br>(S) $\epsilon_3 = 10,20$     |
| $\text{CdTe}$ | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 6,8$<br>(T) $r_{41} = 6,8$<br>(T) $r_{41} = 5,5$<br>(T) $r_{41} = 5,0$               | 3,39<br>10,6<br>23,35<br>27,95           | —<br>(S) $\epsilon = 9,4$<br>—<br>—                                                                            |
| $\text{HgS}$  | 32          | (S) $r_{11} = 3,1$<br>(S) $r_{41} = 1,4$<br>(S) $r_{11} = 4,2$<br>(S) $r_{41} = 2,4$               | 0,633<br>0,633<br>3,39<br>3,39           | —<br>—<br>—<br>—                                                                                               |
| $\text{ZnS}$  | 6mm         | (S) $r_{33} = 1,8$<br>(S) $r_{33} = 1,7$<br>(S) $r_{13} = 0,9$                                     | 0,633<br>3,39<br>0,633                   | (T) $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 8,7$<br>(S) $\epsilon_1 = 8,7$<br>—                                             |
| $\text{ZnSe}$ | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 2,0$<br>(S) $r_{41} = 2,0$<br>(T) $r_{41} = 2,2$                                     | 0,546<br>0,633<br>10,6                   | (T) $\epsilon = 9,1$<br>(S) $\epsilon = 9,1$<br>—                                                              |

| Вещество | Симметрия   | $r_{lk}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                                                                                 | $\lambda$ , мкм                                              | $\epsilon_i$                                                                                |
|----------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| ZnTe     | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 4,45 \div 3,95$<br>(T) $r_{41} = 1,4$<br>(S) $r_{41} = 4,3$<br>(S) $r_{41} = 3,2$                                                           | 0,59; 0,69<br>10,6<br>0,633<br>3,39                          | (T) $\epsilon = 10,1$<br>(S) $\epsilon = 10,1$<br>—<br>—                                    |
| GaP      | $\bar{4}3m$ | (S) $r_{41} = -1,07 \div (-0,97)$                                                                                                                         | 0,56; 3,39                                                   | (S) $\epsilon = 12$<br>(S) $\epsilon = 10$                                                  |
| GaAs     | $\bar{4}3m$ | (S) $r_{41} = 1,2$<br><br>(S) $r_{41} = -1,5$<br>(S+T) $r_{41} = 1,2 \div 1,6$<br>(T) $r_{41} = 1,0 \div 1,2$<br>(T) $r_{41} = 1,6$<br>(S) $r_{41} = 1,5$ | 0,9<br>1,08<br>3,39<br>1,0; 3,0<br>4,0; 12,0<br>10,6<br>10,6 | (S) $\epsilon = 13,2$<br>(S) $\epsilon = 12,3$<br>(T) $\epsilon = 12,5$<br>—<br>—<br>—<br>— |

Таблица 33.4. Электрооптические свойства кристаллов различных типов [2]

| Вещество                                                                        | Симметрия   | $r_{lk}$ , $10^{-12}$ м/В                                                  | $\lambda$ , мкм         | $n_i$ ( $\lambda$ , мкм)                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bi <sub>4</sub> (GeO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                                | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 1,03$                                                        | 0,45—0,62               | $n_0 = 2,07$                                                                             |
| (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> N <sub>4</sub> (НМТ — гексаметилентетрамин)     | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} = 0,71 \div 0,8$<br>(T) $r_{41} = 0,78$<br>(S) $r_{41} < 0,14$ | 0,546<br>0,633<br>0,633 | $n_0 = 1,591$ (0,589)<br>$n_0 = 1,594$ (0,633)<br>—                                      |
| Гайинит (минерал)                                                               | $\bar{4}3m$ | (T) $r_{41} < 0,04$                                                        | 0,633                   | $n_0 = 1,496$                                                                            |
| K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                  | 23          | (T) $r_{41} = 0,40$                                                        | 0,546                   | $n_0 = 1,535$ (0,589)                                                                    |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Cd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 23          | (T) $r_{41} = 0,70$                                                        | 0,546                   | $n_0 = 1,606$ (0,589)                                                                    |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Mn <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 23          | (T) $r_{41} = 0,53$                                                        | 0,546                   | $n_0 = 1,57$ (0,589)                                                                     |
| Tl <sub>2</sub> Cd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                 | 23          | (T) $r_{41} = 0,37$                                                        | 0,546                   | $n_0 = 1,730$ (0,589)                                                                    |
| K <sub>2</sub> Mn <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                  | 23          | (T) $r_{41} = 2,0$                                                         | 0,453—0,642             | 1,62 (0,45—0,65)                                                                         |
| Rb <sub>2</sub> Mn <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                 | 23          | (T) $r_{41} = 1,9$                                                         | 0,453—0,642             | 1,60 (0,45—0,65)                                                                         |
| Tl <sub>2</sub> Mn <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                 | 23          | (T) $r_{41} = 2,1$                                                         | 0,453—0,642             | 1,80 (0,45—0,65)                                                                         |
| K <sub>2</sub> Ni <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                  | 23          | (T) $r_{41} = 1,0$                                                         | 0,453—0,642             | 1,70 (0,45—0,65)                                                                         |
| NaClO <sub>3</sub>                                                              | 23          | (T) $r_{41} = 0,4$                                                         | 0,589                   | $n_0 = 1,515$                                                                            |
| Na <sub>3</sub> SbS <sub>4</sub> · 9H <sub>2</sub> O                            | 23          | (T) $n_1^3 r_{41} = 5,66$<br>(T) $n_1^3 r_{41} = 5,62$                     | 0,42<br>1,08            | —<br>—                                                                                   |
| Уранилацетат натрия                                                             | 23          | (T) $r_{41} = 0,87$                                                        | 0,546                   | $n_0 = 1,507$ (0,546)                                                                    |
| LiKSO <sub>4</sub>                                                              | 6           | (T) $r_c = 1,6$                                                            | 0,546                   | $n_3 \approx n_1 = n_2 = 1,474$ (0,546)                                                  |
| LiNaSO <sub>4</sub>                                                             | 3m          | (T) $r_{22} < 0,02$                                                        | 0,546                   | $\{ n_3 = 1,495$<br>$\{ n_1 = n_2 = 1,490$                                               |
| Турмалин                                                                        | 3m          | (T) $r_{22} = 0,3$<br>(S) $r_{33} = r_{13} = 1,7$                          | 0,589<br>0,633          | $n_3 = 1,65$<br>$n_1 = n_2 = 1,63$                                                       |
| Na <sub>3</sub> Li (CrO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O         | 3m          | (T) $r_{22} = 0,92$<br>(T) $r_{22} = 0,82$<br>(T) $r_{22} = 0,77$          | 0,50<br>0,52<br>0,60    | $n_1 = n_2 = 1,643$ (0,50)<br>$n_1 = n_2 = 1,635$ (0,52)<br>$n_1 = n_2 = 1,612$ (0,60)   |
| Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub> (прустит)* <sup>1</sup>                        | 3m          | (S) ( $n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33}$ ) = 70<br>(S) $n_1^3 r_{22} = 29$      | 0,633<br>0,633          | $n_1 = 3,02$ (0,633)<br>$n_3 = 2,74$ (0,633)                                             |
| K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>6</sub>                                    | 32          | (T) $r_{11} = 0,26$                                                        | 0,546                   | $\{ n_3 = 1,1518$<br>$\{ n_1 = n_2 = 1,456$                                              |
| Cs <sub>2</sub> C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub>                    | 32          | (T) $r_{11} = 1,0$                                                         | 0,546                   | $\{ n_3 = 1,546$<br>$\{ n_1 = n_2 = 1,564$                                               |
| SrS <sub>2</sub> O <sub>6</sub> · 4H <sub>2</sub> O                             | 32          | (T) $r_{11} = 0,1$                                                         | 0,546                   | $\{ n_3 = 1,528$<br>$\{ n_1 = n_2 = 1,532$                                               |
| Se* <sup>2</sup>                                                                | 32          | (S) $n_1^3 r_{11} = 89$<br>(S) $r_{11} \sim 2,5$                           | 1,15<br>10,6            | $\{ n_1 = 2,737$ (1,15)<br>$\{ n_3 = 3,573$<br>$\{ n_1 = 2,64$ (10,6)<br>$\{ n_3 = 3,41$ |

| Вещество                                                                              | Симметрия   | $r_{lh}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $\lambda$ , мкм                                                      | $n_i$ ( $\lambda$ , мкм)                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> (кварц)* <sup>3</sup>                                                | 32          | (T) $r_{11} = -0,47$<br>(T) $r_{11} = 0,20$<br>(S) $r_{11} = 0,23$<br>(S) $r_{11} = 0,29$<br>(S) $r_{11} = 0,174$                                                                                                                                                                                                                    | 0,409—0,605<br>0,633<br>0,633<br>0,633<br>0,633                      | $n_3 = 1,555$ (0,546)<br>$n_1 = n_2 = 1,546$ (0,546)<br>—<br>—<br>— |
| (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> NaBr · H <sub>2</sub> O | 32          | (T) $r_{11} = 0,1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,546                                                                | $n_3 = 1,560$ (0,546)                                               |
| AgGaS <sup>*4</sup>                                                                   | $\bar{4}2m$ | (T) $r_{63} = 3,0$<br>(T) $r_{41} = 4,0$                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,633<br>0,633                                                       | $n_1 = n_2 = 2,55$ (0,633)<br>$n_3 = 2,50$                          |
| Gd <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> * <sup>5</sup>                       | $\bar{4}2m$ | (T) $n_1^3 r_{63} = 17$ (450 K)                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,633                                                                | $n_1 = n_2 = 1,528$<br>$n_1 \approx n_2 = 1,848$ (0,633)            |
| CdGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub>                                                      | $mm2$       | (T) $n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33} = 17,5$ (300 K)                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,633                                                                | $n_3 = 1,901$ (0,633)                                               |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O      | $\bar{4}$   | (T) $r_{13} = 0,37$<br>$r_{63} = 3,5$                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,50<br>0,50                                                         | } $n_1 = n_2 = 2,3$ (0,50)                                          |
|                                                                                       | 222         | (T) $r_{41} = 230$<br>(T) $r_{52} = 330$<br>(T) $r_{63} = 250$<br>(T) $r \ll 250$<br>(S) $r_{63} \approx 2$                                                                                                                                                                                                                          | 0,633<br>0,633<br>0,633<br>0,633<br>0,633                            |                                                                     |
| NaNO <sub>2</sub> * <sup>6</sup>                                                      | $mm2$       | (T) $r_{22} - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^3 r_{32} = 4,1$<br>(T) $r_{32} - \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^3 r_{12} = 4,2$<br>(T) $r_{22} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 r_{12} = 0,6$                                                                                                                                               | 0,546<br>0,546<br>0,546                                              | $n_1 = 1,347$ (0,546)<br>$n_2 = 1,415$<br>$n_3 = 1,661$             |
| C(CH <sub>2</sub> OH) <sub>4</sub>                                                    | 2           | (T) $r_{43} = -1,9$<br>(T) $r_{61} = -3,0$<br>(T) $r_{52} = 1,45$<br>(T) $ r_{12} - r_{32}  = 0,7$                                                                                                                                                                                                                                   | 0,546<br>0,546<br>0,46—0,70<br>0,46—0,70                             | —<br>—<br>$n_1 = 1,528$<br>$n_2 \approx n_3 = 1,56$                 |
| Ca <sub>2</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>7</sub>                                        | 2           | (T) $\left  r_{22} - \frac{n_1^3}{n_2^3} r_{12} \right  = 12$<br>(T) $\left  r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right  = 14$<br>(S) $\left  r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right  = 13$<br>(S) $r_{12} = 6,7$<br>(S) $r_{22} = 25,5$<br>(S) $r_{32} = 6,4$<br>(S) $r_{41} = 2,7$<br>(S) $r_{52} < 0,6$<br>(S) $r_{63} = 0,9$ | 0,63<br>0,63<br>0,63<br>0,63<br>0,63<br>0,63<br>0,63<br>0,63<br>0,63 | $n_1 = 1,97$<br>$n_2 = 2,16$<br>$n_3 = 2,17$                        |

\*<sup>1</sup> Прозрачен от 0,6 до 13 мкм;  $\epsilon_1 \approx \epsilon_3 = 20$ ;  $\rho = 10^5$  Ом · см.\*<sup>2</sup> Граница прозрачности около 8 мкм;  $\epsilon_1 \approx 8$ .\*<sup>3</sup>  $r_{11} < 0$  и  $r_{41} > 0$  в левовращающем кварце.\*<sup>4</sup> (S)  $\epsilon_3 = 14$ , (S)  $\epsilon_4 = 10$ .\*<sup>5</sup>  $T_C = 432$  K,  $\epsilon_3 = 8$ .\*<sup>6</sup>  $\lambda_2$  принято полярной осью, переход в  $mmm$  при 432 K: (S)  $\epsilon_1 = 5$ ,  $\epsilon_2 = 4$ ,  $\epsilon_3 = 8$ .

### 33.3. МАГНИТНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

Поворот плоскости поляризации света, распространяющегося в среде, находящейся во внешнем магнитном

поле, называют линейным магнитооптическим эффектом или эффектом Фарадея. В пара- и диамагнитных материалах угол поворота плоскости поляризации  $\varphi_F$ , мин, дается соотношением



$$\varphi_F = VHI \cos \gamma, \quad (33.1)$$

где  $V$  — постоянная Верде,  $\frac{\text{мин}}{(\text{А/м}) \cdot \text{м}} = \frac{\text{мин}}{\text{А}}$ , зависящая от природы вещества, частоты света и температуры;  $H$  — напряженность приложенного магнитного поля,  $\text{А/м}$ ;  $l$  — длина пути луча в веществе,  $\text{м}$ ;  $\gamma$  — угол между направлением приложенного поля и направлением распространения луча,  $\text{град}$ .

В ферромагнитных материалах напряженность магнитного поля в выражении для  $\varphi_F$  заменяется намагниченностью  $M$ ,  $\text{Тл}$ , а постоянная Верде — постоянной Кундта  $K$ ,  $\text{град}/(\text{Тл} \cdot \text{см})$ . В таблицах обычно приводят характерное для ферромагнетиков значение параметра вращения при насыщенной намагниченности  $M_S$ ,  $\text{Тл}$ , определяемое как удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации  $M_S$  для света, распространяющегося вдоль вектора намагниченности  $M_S$ , т. е.

$$F = KM_S, \quad (33.2)$$

где  $F$  — удельное фарадеевское вращение,  $\text{град/см}$ .

При рассмотрении магнитооптических характеристик веществ необходимо учитывать ослабление излуче-

ния при распространении его во вращающей плоскости поляризации среде. Для характеристики «качества» различных магнитоактивных сред служит величина  $2F/\alpha$ , где  $\alpha$  — коэффициент ослабления или поглощения в законе  $I = I_0 \exp(-\alpha l)$ .

К соотношениям (33.1) и (33.2) применимо обычное правило правой руки. Так, положительные  $\varphi_F$  и  $F$  соответствуют случаю, когда свет распространяется вдоль направления магнитного поля и плоскость поляризации вращается по часовой стрелке.

В табл. 33.5—33.7 — приняты следующие обозначения:

- $T_C$  — температура Кюри;
- $T_p$  — температура фазового перехода;
- $T_N$  — температура Нееля;
- $T_{co}$  — температура компенсации;
- $M_S$ ,  $\text{Тл}$  — индукция насыщения при 0 К;
- $F$ ,  $\text{град/см}$  — удельное фарадеевское вращение;
- $\alpha$ ,  $\text{см}^{-1}$  — коэффициент поглощения;
- $2F/\alpha$ ,  $\text{град}$  — характеристики качества;
- $\lambda$ ,  $\text{нм}$  — длина волны излучения;
- ОЦК — объемноцентрированный куб;
- ГПУ — гексагональная плотная упаковка;
- ГЦК — гранецентрированный куб.

Таблица 33.5. Характеристики ферромагнитных, ферримагнитных и антиферромагнитных веществ [1]

| Вещество                                | Структура или состав             | Критическая температура, К | $M_S$ , Тл | $F$ , град/см     | $\alpha$ , $\text{см}^{-1}$ | $2F/\alpha$ , град | $T$ , К | $\lambda$ , нм |
|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|---------|----------------|
| Металлы переходной группы: Fe           | ОЦК                              | $T_{\text{кр}}=1043$       | 0,1735     | $3,5 \cdot 10^5$  | $7,6 \cdot 10^5$            | 0,92               | 300     | 546            |
|                                         |                                  |                            |            | $5,1 \cdot 10^5$  | $3,2 \cdot 10^5$            | 3,1                | 300     | 1000           |
|                                         |                                  |                            |            | $4,4 \cdot 10^5$  | $6,5 \cdot 10^5$            | 1,4                | 300     | 500            |
|                                         |                                  |                            |            | $6,5 \cdot 10^5$  | $5 \cdot 10^5$              | 2,6                | 300     | 1000           |
|                                         |                                  |                            |            | $7 \cdot 10^5$    | $4,2 \cdot 10^5$            | 3,3                | 300     | 1500           |
|                                         |                                  |                            |            | $7 \cdot 10^5$    | $3,5 \cdot 10^5$            | 4,0                | 300     | 2000           |
| Co                                      | ГПУ                              | $T_{\text{кр}}=1390$       | 0,145      | $3,6 \cdot 10^5$  | $8,5 \cdot 10^5$            | 0,85               | 300     | 546            |
|                                         |                                  |                            |            | $2,9 \cdot 10^5$  | —                           | —                  | 300     | 500            |
|                                         |                                  |                            |            | $5,5 \cdot 10^5$  | $6,1 \cdot 10^5$            | 1,8                | 300     | 1000           |
|                                         |                                  |                            |            | $5,5 \cdot 10^5$  | $4,5 \cdot 10^5$            | 2,4                | 300     | 1500           |
|                                         |                                  |                            |            | $4,8 \cdot 10^5$  | $3,6 \cdot 10^5$            | 2,7                | 300     | 2000           |
|                                         |                                  |                            |            | $0,99 \cdot 10^5$ | $8,0 \cdot 10^5$            | 0,25               | 300     | 546            |
| Ni                                      | ГЦК                              | $T_{\text{кр}}=633$        | 0,051      | $7,2 \cdot 10^5$  | $4,2 \cdot 10^5$            | 3,4                | 300     | 4000           |
|                                         |                                  |                            |            | $0,8 \cdot 10^5$  | —                           | —                  | 300     | 500            |
|                                         |                                  |                            |            | $2,6 \cdot 10^5$  | $5,8 \cdot 10^5$            | 0,9                | 300     | 1000           |
|                                         |                                  |                            |            | $1,5 \cdot 10^5$  | $4,8 \cdot 10^5$            | 0,6                | 300     | 1500           |
|                                         |                                  |                            |            | $1 \cdot 10^5$    | $4,1 \cdot 10^5$            | 0,25               | 300     | 2000           |
|                                         |                                  |                            |            | $0,79 \cdot 10^5$ | —                           | —                  | 300     | 546            |
| Ni*1<br>(монокристалл)                  |                                  |                            |            | $0,88 \cdot 10^5$ | —                           | —                  | 300     | 546            |
|                                         |                                  |                            |            | $0,97 \cdot 10^5$ | —                           | —                  | 300     | 546            |
|                                         |                                  |                            |            |                   |                             |                    |         |                |
| Бинарные соединения и сплавы: пермаллой | ГЦК<br>(Ni:Fe, %, 82:18)<br>NiAs | $T_{\text{кр}}=803$        | 0,085      | $1,2 \cdot 10^5$  | $6 \cdot 10^5$              | 0,4                | 300     | 500            |
|                                         |                                  |                            |            | $0,5 \cdot 10^5$  | $2,0 \cdot 10^5$            | 0,5                | 300     | 550            |
|                                         |                                  |                            |            | $0,4 \cdot 10^5$  | $1,2 \cdot 10^5$            | 0,7                | 300     | 900            |
| CrTe                                    | NiAs                             | $T_{\text{кр}}=334$        | 0,0081     | $0,4 \cdot 10^5$  | $0,6 \cdot 10^5$            | 1,3                | 300     | 2500           |
|                                         |                                  |                            |            | $0,44 \cdot 10^5$ | $5,0 \cdot 10^5$            | 0,174              | 300     | 500            |
|                                         |                                  |                            |            | $0,49 \cdot 10^5$ | $4,9 \cdot 10^5$            | 0,200              | 300     | 600            |
|                                         |                                  |                            |            | $0,59 \cdot 10^5$ | $4,6 \cdot 10^5$            | 0,26               | 300     | 700            |
|                                         |                                  |                            |            | $0,78 \cdot 10^5$ | $4,5 \cdot 10^5$            | 0,34               | 300     | 800            |
|                                         |                                  |                            |            | $0,62 \cdot 10^5$ | $4,4 \cdot 10^5$            | 0,28               | 300     | 900            |
| MnAs                                    | NiAs                             | $T_{\text{кр}}=313$        | —          |                   |                             |                    |         |                |
|                                         |                                  |                            |            |                   |                             |                    |         |                |
|                                         |                                  |                            |            |                   |                             |                    |         |                |
|                                         |                                  |                            |            |                   |                             |                    |         |                |
|                                         |                                  |                            |            |                   |                             |                    |         |                |
|                                         |                                  |                            |            |                   |                             |                    |         |                |

| Вещество                         | Структура<br>или состав                | Критическая<br>температура, К | $M_S$ , Тл                    | $F$ , град/см                    | $\alpha$ , см <sup>-1</sup> | $2F/\alpha$ , град | $T$ , К | $\lambda$ , нм |     |   |     |      |
|----------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------|----------------|-----|---|-----|------|
| MnBi                             | NiAs<br>(низкотемпе-<br>ратурная фаза) | $T_{кр} = 639$                | 0,061<br>(0,060 при<br>300 К) | 4,2·10 <sup>5</sup>              | 6,1·10 <sup>5</sup>         | 1,4                | 300     | 450            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 5,0·10 <sup>5</sup>              | 5,8·10 <sup>5</sup>         | 1,7                | 300     | 500            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 7,0·10 <sup>5</sup>              | 5,1·10 <sup>5</sup>         | 2,8                | 300     | 600            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 7,7·10 <sup>5</sup>              | 4,5·10 <sup>5</sup>         | 3,4                | 300     | 700            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 7,6·10 <sup>5</sup>              | 4,3·10 <sup>5</sup>         | 3,5                | 300     | 800            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 7,5·10 <sup>5</sup>              | 4,2·10 <sup>5</sup>         | 3,6                | 300     | 900            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 7,4·10 <sup>5</sup>              | 4,1·10 <sup>5</sup>         | 3,6                | 300     | 1000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,2·10 <sup>5</sup>              | 6,1·10 <sup>5</sup>         | 1,0                | 300     | 450            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,3·10 <sup>5</sup>              | 5,8·10 <sup>5</sup>         | 1,1                | 300     | 500            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,3·10 <sup>5</sup>              | 5,1·10 <sup>5</sup>         | 1,3                | 300     | 600            |     |   |     |      |
|                                  | Высокотемпе-<br>ратурная фаза          | $T_{кр} = 453$                | (0,044 при<br>300 К)          | 3,3·10 <sup>5</sup>              | 4,7·10 <sup>5</sup>         | 1,4                | 300     | 700            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,3·10 <sup>5</sup>              | 4,5·10 <sup>5</sup>         | 1,4                | 300     | 800            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,2·10 <sup>5</sup>              | 4,4·10 <sup>5</sup>         | 1,4                | 300     | 900            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,2·10 <sup>5</sup>              | 4,4·10 <sup>5</sup>         | 1,4                | 300     | 1000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 0,9·10 <sup>5</sup>              | 3,3·10 <sup>5</sup>         | 0,56               | 348     | 700            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 1,2·10 <sup>5</sup>              | 7,05·10 <sup>5</sup>        | 0,34               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 1,6·10 <sup>5</sup>              | 7,14·10 <sup>5</sup>        | 0,45               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 2,2·10 <sup>5</sup>              | 7,10·10 <sup>5</sup>        | 0,62               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 2,7·10 <sup>5</sup>              | 7,0·10 <sup>5</sup>         | 0,77               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 2,9·10 <sup>5</sup>              | 7,54·10 <sup>5</sup>        | 0,77               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
| FeRh<br>Ni + Fe                  | —                                      | $T_p = 333$                   | —                             | 2,8·10 <sup>5</sup>              | 8,13·10 <sup>5</sup>        | 0,69               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,048                         | 2,2·10 <sup>5</sup>              | 8,17·10 <sup>5</sup>        | 0,54               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,067                         | —                                | 8,13·10 <sup>5</sup>        | —                  | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,086                         | 3,3·10 <sup>5</sup>              | 8,1·10 <sup>5</sup>         | 0,81               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,103                         | 3,6·10 <sup>5</sup>              | 8,13·10 <sup>5</sup>        | 0,88               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,119                         | 3,5·10 <sup>5</sup>              | 8,13·10 <sup>5</sup>        | 0,86               | 300     | 632,8          |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,127                         | 2,1·10 <sup>5</sup>              | 7,7·10 <sup>5</sup>         | 0,55               | 300     | 400—700        |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,115                         | —                                | —                           | —                  | —       | —              |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,064                         | —                                | —                           | —                  | —       | —              |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               | 0,154                         | —                                | —                           | —                  | —       | —              |     |   |     |      |
| Ферриты:                         | —                                      | —                             | —                             | —440                             | 150                         | 6                  | 300     | 1500           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | —190                             | 135                         | 3                  | 300     | 2000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +10                              | 85                          | 0,2                | 300     | 3000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +85                              | 60                          | 3                  | 300     | 4000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +110                             | 44                          | 5                  | 300     | 5000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +125                             | 44                          | 6                  | 300     | 6000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +135                             | 80                          | 3                  | 300     | 7000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | —                           | —                  | —       | —60            | 100 | 1 | 300 | 2500 |
|                                  |                                        |                               |                               |                                  |                             |                    |         | —40            | 40  | 2 | 300 | 3000 |
|                                  |                                        |                               |                               |                                  |                             |                    |         | 0              | 12  | 0 | 300 | 4000 |
| +30                              | 4                                      | 15                            | 300                           |                                  |                             |                    |         | 5000           |     |   |     |      |
| +35                              | 6                                      | 11                            | 300                           |                                  |                             |                    |         | 6000           |     |   |     |      |
| +50                              | 13                                     | 8                             | 300                           |                                  |                             |                    |         | 7000           |     |   |     |      |
| CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Шпинель                                | $T_N = 793$                   | 0,0392                        | 2,75·10 <sup>4</sup>             | 12·10 <sup>4</sup>          | 0,5                | 300     | 286            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,8·10 <sup>4</sup>              | 14·10 <sup>4</sup>          | 0,5                | 300     | 330            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 3,6·10 <sup>4</sup>              | 17·10 <sup>4</sup>          | 0,4                | 300     | 400            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 1,3·10 <sup>4</sup>              | 13·10 <sup>4</sup>          | 0,2                | 300     | 500            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | —2,5·10 <sup>4</sup>             | 6·10 <sup>4</sup>           | 0,8                | 300     | 660            |     |   |     |      |
| NiFeO <sub>4</sub>               | Шпинель                                | $T_N = 858$                   | 0,0267                        | 2,0·10 <sup>4</sup>              | 5,9·10 <sup>4</sup>         | 0,7                | 300     | 286            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | 2,4·10 <sup>4</sup>              | 7,4·10 <sup>4</sup>         | 0,7                | 300     | 330            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | —0,75·10 <sup>4</sup>            | 16·10 <sup>4</sup>          | 0,09               | 300     | 400            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | —1,0·10 <sup>4</sup>             | 10 <sup>5</sup>             | 0,2                | 300     | 500            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +0,12·10 <sup>4</sup>            | 10 <sup>4</sup>             | 0,2                | 300     | 660            |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | —120                             | 38                          | 6                  | 300     | 1500           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +40                              | 32                          | 2,5                | 300     | 2000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +75                              | 15                          | 10                 | 300     | 3000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +110                             | 15                          | 15                 | 300     | 4000           |     |   |     |      |
|                                  |                                        |                               |                               | +110                             | 32                          | 7                  | 300     | 5000           |     |   |     |      |

| Вещество                                                                         | Структура или состав | Критическая температура, К    | $M_S$ , Тл | $F$ , град/см                                                                                                             | $\alpha$ , см <sup>-1</sup>                                                                                      | $2F/\alpha$ , град                                                           | $T$ , К                                              | $\lambda$ , нм                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| YIG                                                                              | Гранат               | $T_N = 560$                   | 0,020      | 240<br>2400<br>1750<br>1250<br>800<br>900<br>750<br>175                                                                   | 0,069<br>1500<br>1350<br>1400<br>1150<br>670<br>450<br><0,06                                                     | $7 \cdot 10^3$<br>3,2<br>2,6<br>1,8<br>1,4<br>2,7<br>3,3<br>> $3 \cdot 10^3$ | 300<br>300<br>300<br>300<br>300<br>300<br>300<br>300 | 1200<br>555<br>588<br>625<br>667<br>715<br>770<br>1500 |
| BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>                                               | Гексагональ-<br>ная  | —                             | —          | —50<br>+75<br>+130                                                                                                        | 38<br>20<br>13                                                                                                   | 3<br>7,5<br>20                                                               | 300<br>300<br>300                                    | 2000<br>3000<br>4000                                   |
| BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>                                               | Гексагональ-<br>ная  | —                             | —          | +150<br>+160<br>+165                                                                                                      | 20<br>20<br>22                                                                                                   | 15<br>16<br>15                                                               | 300<br>300<br>300                                    | 5000<br>6000<br>7000                                   |
| Ba <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>                 | Гексагональ-<br>ная  | —                             | —          | +90<br>+80<br>+75<br>+70                                                                                                  | 120<br>70<br>65<br>85                                                                                            | 1,5<br>2<br>2<br>2                                                           | 300<br>300<br>300<br>300                             | 5000<br>6000<br>7000<br>8000                           |
| GdIG                                                                             | Гранат               | $T_N = 564$<br>$T_{co} = 286$ | 0,058      | —2000<br>—1050<br>—450<br>—300<br>—220<br>—80                                                                             | 6000<br>900<br>400<br>100<br>230<br>70                                                                           | 0,6<br>2,3<br>2,3<br>6<br>1,9<br>2,3                                         | 300<br>300<br>300<br>300<br>300<br>300               | 500<br>600<br>700<br>800<br>900<br>1000                |
| Фториды:<br>RbNi <sub>0,75</sub> Co <sub>0,25</sub> F <sub>3</sub> <sup>*2</sup> | Перовскит            | $T_N = 109$                   | —          | 180                                                                                                                       | 9                                                                                                                | 40                                                                           | 77                                                   | 600                                                    |
| RbFeF <sub>3</sub> <sup>*</sup>                                                  | Перовскит            | $T_p = 102$                   | —          | 3400<br>1600<br>950<br>620<br>420<br>300                                                                                  | 7<br>3<br>4,6<br>1,5<br>1,2<br>2,5                                                                               | 900<br>1100<br>410<br>830<br>700<br>240                                      | 82<br>82<br>82<br>82<br>82<br>82                     | 300<br>400<br>500<br>600<br>700<br>800                 |
| RbNiF <sub>3</sub> <sup>*3</sup>                                                 | Перовскит            | $T_N = 139$                   | 0,0099     | 360<br>210<br>70<br>—70<br>310<br>100<br>75                                                                               | 35<br>12<br>10<br>30<br>70<br>60<br>25                                                                           | 20<br>35<br>14<br>5<br>9<br>3<br>6                                           | 77<br>77<br>77<br>77<br>77<br>77<br>77               | 450<br>500<br>600<br>700<br>800<br>900<br>1000         |
| Тригаллды:<br>CrCl <sub>3</sub>                                                  | BiI <sub>3</sub>     | $T_K = 16,8$                  | 0,031      | 2000<br>—500<br>—1000                                                                                                     | 200<br>300<br>70                                                                                                 | 20<br>3<br>30                                                                | 1,5<br>1,5<br>1,5                                    | 410<br>450<br>590                                      |
| CrBr <sub>3</sub>                                                                | BiI <sub>3</sub>     | $T_K = 32,5$                  | 0,0270     | $3 \cdot 10^5$<br>$1,6 \cdot 10^5$                                                                                        | $3 \cdot 10^3$<br>$1,4 \cdot 10^4$                                                                               | 200<br>23                                                                    | —<br>1,5                                             | 478<br>500                                             |
| CrI <sub>3</sub>                                                                 | BiI <sub>3</sub>     | $T_K = 68$                    | 0,0214     | $1,1 \cdot 10^5$<br>$0,8 \cdot 10^5$                                                                                      | $6,3 \cdot 10^3$<br>$3 \cdot 10^3$                                                                               | 35<br>53                                                                     | 1,5<br>1,5                                           | 970<br>1000                                            |
| Халькогениды:<br>EuO                                                             | NaCl                 | $T_C = 69$                    | 0,189      | — $1,0 \cdot 10^5$<br>$3,2 \cdot 10^5$<br>$5 \cdot 10^5$<br>$3,6 \cdot 10^5$<br>$0,5 \cdot 10^5$<br>$3 \cdot 10^4$<br>660 | $0,5 \cdot 10^4$<br>$7,5 \cdot 10^4$<br>$9,7 \cdot 10^4$<br>$9,7 \cdot 10^4$<br>$7,8 \cdot 10^4$<br>>0,5<br>>1,0 | 40<br>8,5<br>10<br>7,5<br>1,3<br>~ $10^5$<br>~1300                           | 5<br>5<br>5<br>6<br>5<br>20<br>20                    | 1100<br>800<br>700<br>600<br>500<br>2500<br>10 600     |

| Вещество | Структура или состав | Критическая температура, К | $M_S$ , Тл | $F$ , град/см                                                                  | $\alpha$ , см <sup>-1</sup>                                          | $2F/\alpha$ , град   | $T$ , К           | $\lambda$ , нм           |
|----------|----------------------|----------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|
| EuS      | NaCl                 | $T_C = 16,3$               | —          | $-1,6 \cdot 10^5$<br>$-9,6 \cdot 10^5$<br>$5,5 \cdot 10^5$<br>$5,1 \cdot 10^5$ | $\sim 0$<br>$3,3 \cdot 10^3$<br>$1,2 \cdot 10^5$<br>$1,0 \cdot 10^5$ | —<br>58<br>92<br>10  | 6<br>6<br>6<br>6  | 825<br>690<br>563<br>495 |
| EuSe     | NaCl                 | $T_C = 7$                  | 0,105      | $1,45 \cdot 10^5$<br>$1,17 \cdot 10^5$<br>$0,95 \cdot 10^5$                    | 80<br>70<br>60                                                       | 3600<br>3340<br>3170 | 4,2<br>4,2<br>4,2 | 750<br>775<br>800        |

| Вещество                          | $M_S$ , $10^{-3}$ Тл | $F$ , град/см, для длин волн, нм |      |      |      |      |      | $\alpha$ , см <sup>-1</sup> , для $\lambda = 1250$ нм |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|-------------------------------------------------------|
|                                   |                      | 620                              | 800  | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |                                                       |
| Ортоферриты* <sup>4</sup> :       |                      |                                  |      |      |      |      |      |                                                       |
| [3]                               |                      |                                  |      |      |      |      |      |                                                       |
| DyFeO <sub>3</sub> * <sup>5</sup> | 1,02                 | 4300                             | 1700 | 1100 | 670  | 480  | 370  | $\sim 40$                                             |
| YFeO <sub>3</sub> * <sup>5</sup>  | 0,84                 | 3000                             | 1200 | 670  | 520  | 370  | 260  | $\sim 10$                                             |

\*<sup>1</sup> Направление световой волны соответственно вдоль [100], [110] и [111].

\*<sup>2</sup> Имеется сильное естественное двулучепреломление.

\*<sup>3</sup> Измерено вдоль оси  $c$ .

\*<sup>4</sup> Все ортоферриты обладают сильным естественным двулучепреломлением.

\*<sup>5</sup> Оптические оси лежат в плоскости (100) и с осью  $c$  составляют угол, изменяющийся от 52 до 46° при изменении длины волны от 620 до 1600 нм.

Таблица 33.6. Характеристики парамагнитных веществ [2]

| Таблица 33.6. Характеристики парамагнитных веществ [2] |                  |                 |             |                                  |                    |                             |            |
|--------------------------------------------------------|------------------|-----------------|-------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------|
| Кристалл                                               | Ион              | Концентрация, % | $T$ , К     | $\lambda$ , нм                   | $V$ , мин/А        | $\alpha$ , см <sup>-1</sup> | $V/\alpha$ |
| Ионы редких земель в кристаллах:                       |                  |                 |             |                                  |                    |                             |            |
| CaF <sub>2</sub>                                       | Eu <sup>2+</sup> | 3               | 4,2         | 430                              | 36                 | 11,5                        | 3,1        |
| CaF <sub>2</sub>                                       | Nd <sup>3+</sup> | 2,9             | 4,2         | 440                              | 28                 | 1,8                         | 15         |
| EuF <sub>2</sub>                                       | Eu <sup>2+</sup> | —               | 4,2         | 426,4                            | 0,24               | 5                           | 0,048      |
|                                                        |                  |                 | 300         | 450                              | 5,7                | 20                          | 0,28       |
|                                                        |                  |                 | 300         | 500                              | 3,3                | 7                           | 0,47       |
|                                                        |                  |                 | 300         | 550                              | 2,0                | 6                           | 0,34       |
|                                                        |                  |                 | 300         | 600                              | 1,4                | 5,5                         | 0,25       |
|                                                        |                  |                 | 300         | 650                              | 1,0                | 5                           | 0,2        |
| Вещество                                               | $T$ , К          | $\lambda$ , нм  | $V$ , мин/А | $\lambda$ , нм, при $\alpha$     |                    |                             |            |
|                                                        |                  |                 |             | 10 <sup>4</sup> см <sup>-1</sup> | 1 см <sup>-1</sup> |                             |            |
| Перовскиты (оксиды):                                   |                  |                 |             |                                  |                    |                             |            |
| SrTiO <sub>3</sub>                                     | 298              | 413             | 0,98        | 368                              | 413                |                             |            |
|                                                        |                  | 496             | 0,39        | —                                | —                  |                             |            |
|                                                        |                  | 620             | 0,18        | —                                | —                  |                             |            |
| BaTaO <sub>3</sub>                                     | 403              | 826             | 0,083       | —                                | —                  |                             |            |
|                                                        |                  | 427             | 1,2         | 380                              | 446                |                             |            |
|                                                        |                  | 496             | 0,48        | —                                | —                  |                             |            |
|                                                        |                  | 620             | 0,23        | —                                | —                  |                             |            |
| KTaO <sub>3</sub>                                      | 296              | 826             | 0,09        | —                                | —                  |                             |            |
|                                                        |                  | 352             | 0,55        | 327                              | 370                |                             |            |
|                                                        |                  | 413             | 0,24        | —                                | —                  |                             |            |
|                                                        |                  | 496             | 0,12        | —                                | —                  |                             |            |
|                                                        |                  | 620             | 0,064       | —                                | —                  |                             |            |
|                                                        |                  | 826             | 0,028       | —                                | —                  |                             |            |

| Вещество                | T, К | V, мин/А, для λ, нм |        |        |        |        |        |         |        |
|-------------------------|------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
|                         |      | 405                 | 450    | 480    | 520    | 546    | 578    | 635     | 670    |
| Редкоземельные гранаты: |      |                     |        |        |        |        |        |         |        |
| TbAlG*1                 | 300  | —2,797              | —1,967 | —1,621 | —1,306 | —1,146 | —0,989 | —0,779  | —0,681 |
|                         | 77   | —                   | —      | —      | —4,304 | —3,834 | —3,271 | —2,523  | —2,281 |
|                         | 4,2  | —                   | —128   | —104,9 | —81,43 | —73,32 | —67,57 | —60,81  | —35,93 |
|                         | 1,45 | —                   | —252,5 | —216,8 | —175,0 | —157,2 | —139,8 | —122,5  | —117,4 |
| DyAlG                   | 300  | —1,559              | —1,18  | —1,01  | —0,838 | —0,744 | —0,651 | —0,516  | —0,451 |
| HoAlG                   | 300  | —0,891              | —0,402 | —0,327 | —0,421 | —0,382 | —0,376 | —       | —0,259 |
| ErAlG                   | 300  | —0,237              | —0,302 | —0,193 | —0,204 | —0,197 | —0,182 | —0,132  | —0,112 |
| TmAlG                   | 300  | +0,19               | +0,129 | +0,117 | +0,095 | +0,087 | +0,074 | +0,0603 | —      |
| YbAlG                   | 298  | 0,361               | 0,27   | 0,234  | 0,176  | 0,167  | 0,146  | 0,118   | —      |
|                         | 77   | 0,902               | 0,678  | 0,604  | 0,494  | 0,43   | 0,379  | 0,30    | —      |

\*1  $\alpha \approx 0,2 \div 0,6$  см<sup>-1</sup> при T=300 К.

Таблица 33.7. Магнитооптические свойства стекол [2]

| Массовое содержание, % |     |                                |                               | V, мнн/А, при T = 300 К для λ, нм |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------|-----|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Eu <sup>2+</sup>       | EuO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 406                               | 435 | 450 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 |

## Европиевое стекло

|      |      |      |      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 12,9 | 14,4 | 15,3 | 70,2 | -0,795 | -0,428 | -0,354 | -0,204 | -0,131 | -0,095 | -0,077 | -0,062 | -0,053 | -0,040 |
| 14,7 | 16,5 | 11,2 | 72,0 | -0,940 | -0,503 | -0,411 | -0,25  | -0,165 | -0,113 | -0,088 | -0,069 | -0,058 | -0,048 |
| 17,9 | 20,0 | 13,4 | 66,2 | -1,48  | -0,848 | -0,66  | -0,374 | -0,261 | -0,187 | -0,142 | -0,114 | -0,05  | -0,075 |
| 26,7 | 29,9 | 11,0 | 60,0 | —      | -1,60  | -1,23  | -0,657 | -0,461 | -0,324 | -0,24  | -0,198 | -0,162 | -0,138 |
| 30,5 | 34,2 | 14,8 | 50,7 | —      | —      | -3,2   | -1,58  | -0,906 | -0,601 | -0,46  | -0,337 | -0,283 | -0,219 |

## Боратное стекло с ионами редкоземельных элементов

| Состав*1 |      | V, мин/А, при T = 300 К для λ, нм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------|------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R        | x    | 405                               | 436    | 480    | 500    | 520    | 546    | 578    | 600    | 635    | 670    |
| La       | 3,04 | 0,054                             | 0,045  | 0,036  | 0,033  | 0,029  | 0,028  | 0,024  | 0,023  | 0,020  | 0,018  |
| Pr — La  | 5,44 | —0,477                            | —0,386 | —0,290 | —0,276 | —0,253 | —0,224 | —0,192 | —0,183 | —0,161 | —0,138 |
| Nd — La  | 5,41 | —0,226                            | —0,185 | —0,151 | —0,139 | —0,121 | —0,118 | —0,126 | —0,074 | —0,070 | —0,058 |
| Sm — La  | 4,97 | 0,040                             | 0,038  | 0,031  | 0,030  | 0,028  | 0,024  | 0,021  | 0,020  | 0,018  | 0,013  |
| Eu — La  | 4,69 | —0,101                            | —0,075 | —0,048 | —0,041 | —0,036 | —0,030 | —0,024 | —0,020 | —0,018 | —0,015 |
| Gd — La  | 4,71 | 0,040                             | 0,033  | 0,030  | 0,028  | 0,026  | 0,025  | 0,023  | 0,021  | 0,019  | 0,016  |
| Tb — La  | 4,73 | —0,643                            | —0,526 | —0,401 | —0,362 | —0,329 | —0,291 | —0,258 | —0,234 | —0,210 | —0,178 |
| Dy — La  | 4,88 | —0,548                            | —0,454 | —0,376 | —0,343 | —0,309 | —0,276 | —0,242 | —0,222 | —0,200 | —0,173 |
| Ho — La  | 4,36 | —0,338                            | —0,317 | —0,155 | —0,165 | —0,141 | —0,161 | —0,131 | —0,121 | —      | —0,093 |
| Er — La  | 4,50 | —0,117                            | —0,098 | —0,085 | —0,103 | —      | —0,057 | —0,053 | —0,050 | —0,044 | —0,043 |
| Tm — La  | 4,75 | 0,075                             | 0,058  | 0,049  | 0,043  | 0,039  | 0,038  | 0,029  | 0,026  | 0,023  | 0,020  |
| Yb — La  | 8,58 | 0,144                             | 0,118  | 0,092  | 0,083  | 0,075  | 0,068  | 0,058  | 0,054  | 0,046  | 0,041  |
| Tb — Pr  | 4,99 | —1,18                             | —0,987 | —0,704 | —0,673 | —0,614 | —0,548 | —0,477 | —0,437 | —0,384 | —0,333 |
| Dy — Pr  | 4,63 | —1,07                             | —      | —      | —0,624 | —0,584 | —0,519 | —0,450 | —0,417 | —0,364 | —0,317 |
| Pr       | 2,56 | —1,06                             | —0,812 | —0,592 | —0,603 | —0,543 | —0,490 | —0,420 | —0,398 | —0,340 | —0,305 |

## Алюмосиликатное стекло

| Состав (массовое<br>содержание, %) | V, мнн/А, для $\lambda$ , нм |     |     |     |     |     |     |      |      |      | T, К |
|------------------------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                                    | 365                          | 404 | 546 | 650 | 700 | 800 | 900 | 1100 | 1200 | 1300 |      |

## Празеоимовое

|                                                           |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |      |
|-----------------------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| Rr <sub>6</sub> O <sub>11</sub> (58)                      | —1,31 | —0,955 | —0,440 | —0,299 | —0,249 | —0,185 | —0,141 | —0,084 | —0,064 | —0,044 | 295  |
| SiO <sub>2</sub> (25) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (12) | —4,30 | —3,15  | —1,46  | —0,980 | —0,823 | 0,613  | —0,466 | —0,291 | —0,230 | —0,173 | 77,4 |
| MgO (4) Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1)                |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |      |

## Диспрозиевое

|                                              |       |        |        |        |        |   |   |   |   |   |      |
|----------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|---|---|---|---|---|------|
| Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (58) SiO (25) | —1,11 | —0,849 | —0,422 | —0,290 | —0,237 | — | — | — | — | — | 295  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (12)          | —4,20 | —3,24  | —1,61  | —0,109 | —0,910 | — | — | — | — | — | 77,4 |
| MgO (4) Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1)   |       |        |        |        |        |   |   |   |   |   |      |

## Тербиевое

|                                                           |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |      |
|-----------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| Tb <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (58)                       | —1,4  | —1,08 | —0,490 | —0,332 | —0,276 | —0,200 | —0,151 | —0,093 | —0,074 | —0,059 | 295  |
| SiO <sub>2</sub> (25) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (12) | —5,45 | —4,02 | —1,78  | —0,123 | —1,01  | —0,744 | —0,565 | —0,353 | —0,283 | —0,229 | 77,4 |
| MgO (4) Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1)                |       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |      |

## Продолжение табл. 33.7

| Состав** |   | V, мнн/А, при T = 300 К для $\lambda$ , нм |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|---|--------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| R        | x | 405                                        | 436 | 480 | 500 | 520 | 546 | 578 | 600 | 635 | 670 |

## Фосфатное с ионами редкоземельных элементов (R)\*1

|    |      |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|----|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| La | —    | 0,046  | 0,038  | 0,030  | 0,028  | 0,025  | 0,023  | 0,019  | 0,018  | 0,016   | —       |
| Ce | 2,67 | —0,844 | —0,641 | —0,460 | —0,410 | —0,361 | —0,318 | —0,273 | —0,147 | —0,217  | —0,188  |
| Pr | 3,09 | —0,562 | —0,417 | —0,356 | —0,388 | —0,296 | —0,261 | —0,229 | —0,214 | —0,188  | —0,166  |
| Nd | 2,92 | —0,314 | —0,263 | —0,210 | —0,195 | —0,171 | —0,168 | —0,118 | —0,100 | —0,100  | —0,089  |
| Sm | 2,87 | 0,033  | 0,030  | 0,025  | 0,025  | 0,021  | 0,019  | 0,018  | 0,015  | 0,014   | 0,013   |
| Eu | 2,93 | —0,031 | —0,021 | —0,013 | —0,008 | —0,008 | —0,006 | —0,005 | —0,004 | —0,0025 | —0,0025 |
| Gd | 3,01 | 0,023  | 0,019  | 0,018  | 0,015  | 0,015  | 0,014  | 0,014  | 0,013  | 0,011   | 0,011   |
| Tb | 2,94 | —0,704 | —0,575 | —0,448 | —0,406 | —0,371 | —0,328 | —0,284 | —0,259 | —0,239  | —0,206  |
| Dy | 2,51 | —0,678 | —0,569 | —0,451 | —0,416 | —0,378 | —0,337 | —0,298 | —0,273 | —0,247  | —0,217  |
| Ho | 2,94 | —0,376 | —0,393 | —0,196 | —0,192 | —0,173 | —0,173 | —0,149 | —0,138 | —0,123  | —0,106  |
| Er | 3,01 | —0,175 | —0,152 | —0,126 | —0,139 | —0,119 | —0,078 | —0,075 | —0,072 | —0,064  | —0,055  |
| Tm | 2,79 | 0,024  | 0,016  | 0,015  | 0,011  | 0,010  | 0,008  | 0,006  | 0,005  | 0,005   | 0,009   |
| Yb | 3,01 | 0,109  | 0,090  | 0,070  | 0,063  | 0,057  | 0,051  | 0,045  | 0,040  | 0,036   | 0,030   |

\*1 Состав для La и Pr: R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · x B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; для Tb — Pr и Dy — Pr: R'<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · R''O<sub>3</sub> · x B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; для других R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 0,85 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · x B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.\*2 Состав R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · x P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Таблица 33.8. Значения постоянной Верде  $V$  для жидкостей [2]

| Жидкость            | $\lambda$ , нм | $t$ , °C | $V$ , $10^8$ мин/(Тл·см) |
|---------------------|----------------|----------|--------------------------|
| H <sub>2</sub> O    | 546            | 20       | 1,54                     |
|                     | 578            | 20       | 1,37                     |
|                     | 589            | 20       | 1,307                    |
| HCl                 | 589            | 20       | 2,24                     |
| CCl <sub>4</sub>    | 578            | 20       | 1,68                     |
| NH <sub>3</sub>     | 578            | -40      | 1,73                     |
| PCl <sub>3</sub>    | 578            | 26       | 3,05                     |
| Ni(CO) <sub>4</sub> | 578            | 17       | 7,35                     |
| Br <sub>2</sub>     | 700            | 0        | 5,3                      |
| BrH                 | 589            | 20       | 3,43                     |
| SiCl <sub>4</sub>   | 589            | 16       | 1,89                     |
| HI                  | 589            | 20       | 5,13                     |

Таблица 33.9. Значения постоянной Верде для органических соединений [2]

| Вещество                         | $\lambda$ , нм | $t$ , °C | $V$ , $10^8$ мин/(Тл·см) |
|----------------------------------|----------------|----------|--------------------------|
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>   | 578            | -10      | 1,179                    |
| C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>   | 589            | 20       | 1,1490                   |
| C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>   | 589            | 25       | 1,240                    |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>    | 578            | 20       | 3,10                     |
| C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>   | 589            | 20       | 1,2946                   |
| C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>   | 589            | 15       | 2,47                     |
| C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>  | 589            | 20       | 1,3785                   |
| C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>  | 589            | 15       | 3,82                     |
| C <sub>13</sub> H <sub>12</sub>  | 589            | 15       | 3,22                     |
| CH <sub>3</sub> I                | 578            | 18       | 3,53                     |
| CHCl <sub>3</sub>                | 578            | 18       | 1,67                     |
| CCl <sub>4</sub>                 | 578            | 20       | 1,68                     |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl | 589            | 25       | 2,891                    |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br | 589            | 25       | 3,25                     |
| CH <sub>3</sub> O                | 589            | 26       | 0,9515                   |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O  | 589            | 15,2     | 1,13                     |
| C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N  | 589            | 15,2     | 2,44                     |
| C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N  | 589            | 15       | 4,14                     |

### 33.4. КВАДРАТИЧНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ КЕРРА)

В кристаллах, обладающих центром симметрии, а также в изотропных веществах существует квадратичный электрооптический эффект, при котором изменение

Таблица 33.10. Значения постоянной Керра для газов при давлении  $p = 101,3$  гПа и длине волны  $\lambda = 546$  нм [2]

| Газ                           | $t$ , °C | $K$ , $10^{-24}$ м <sup>2</sup> /В <sup>2</sup> | Газ                                             | $t$ , °C | $K$ , $10^{-24}$ м <sup>2</sup> /В <sup>2</sup> |
|-------------------------------|----------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------|
| H <sub>2</sub>                | 34,6     | 0,50                                            | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>                   | 0        | 0,94                                            |
| O <sub>2</sub>                | 0        | 0,50                                            | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>                   | 0        | 1,18                                            |
| N <sub>2</sub>                | 0        | 0,33                                            | (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O               | 18       | -5,6                                            |
|                               | 22       | 0,16                                            | (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O | 62,7     | -4,3                                            |
| Cl <sub>2</sub>               | 24       | 2,6                                             | CH <sub>3</sub> Cl                              | 18       | 40,5                                            |
| CO <sub>2</sub>               | 17,5     | 1,7                                             | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl                | 18       | 61,3                                            |
| N <sub>2</sub> O              | 56,7     | 24,0                                            | CHCl <sub>3</sub>                               | 89,5     | -8,5                                            |
|                               | 26       | 3,4                                             | CH <sub>2</sub> ClCH <sub>2</sub> Cl            | 108,5    | 5,2                                             |
| HCl                           | 18       | 6,4                                             | (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO              | 83,1     | 5,6                                             |
| H <sub>2</sub> S              | 18       | 1,8                                             | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                   | 113,6    | 6,17                                            |
| NH <sub>3</sub>               | 17,5     | 3,6                                             | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>   | 137,7    | 10,8                                            |
|                               | 20       | 103                                             | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl                | 153,7    | 41,3                                            |
| HCN                           | 18       | -10,4                                           | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>   | 235,5    | 162                                             |
| SO <sub>2</sub>               | 0        | 0,27                                            |                                                 |          |                                                 |
| CH <sub>4</sub>               | 0        | 0,74                                            |                                                 |          |                                                 |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 0        |                                                 |                                                 |          |                                                 |

показателя преломления вещества пропорционально квадрату напряженности электрического поля.

Внешнее электрическое поле  $E$  ориентирует молекулы, обладающие электрическим моментом (дипольным, квадрупольным и т. п.), в результате возникает анизотропия и показатели преломления  $n_{||}$  (вдоль поля) и  $n_{\perp}$  (перпендикулярно полю) становятся различными:  $n_{||} - n_{\perp} = K n E^2$ , разность хода необыкновенного и обыкновенного лучей равна  $\Delta = K n l E^2$ , здесь  $K$  — постоянная Керра, м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>,  $n$  — показатель преломления в отсутствие поля,  $l$  — длина оптического пути, м;  $E$  — напряженность электрического поля, В/м.

Эффект Керра, вызванный электрическим полем световой волны, называют высокочастотным. Значение постоянной Керра зависит от природы вещества, частоты света и температуры (табл. 33.10, 33.11).

Таблица 33.11. Значения постоянной Керра для жидкости при длине волны  $\lambda = 546$  нм [2]

| Жидкость                       | $T$ , К | $K$ , $10^{-24}$ м <sup>2</sup> /В <sup>2</sup> | Жидкость                                                               | $T$ , К | $K$ , $10^{-24}$ м <sup>2</sup> /В <sup>2</sup> |
|--------------------------------|---------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------|
| O <sub>2</sub>                 | 90      | 1,2                                             | орто-<br>C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | 293     | 6,08                                            |
| N <sub>2</sub>                 | 71,4    | 4,46                                            | (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O                        | 293     | -2,95                                           |
| CS <sub>3</sub>                | 293     | 13,4                                            | CHCl <sub>3</sub>                                                      | 293     | 12,9                                            |
| C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> | 293     | 0,252                                           | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl                                       | 293     | 45,1                                            |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>  | 293     | 1,62                                            | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>                          | 293     | 1570                                            |

### 33.5. ЭФФЕКТ ФОТОУПРУГОСТИ

Упругооптический эффект, или эффект фотоупругости, состоит в изменении показателя преломления вещества в результате влияния внешних статических или переменных механических напряжений.

Связь между изменением индикатрисы показателя преломления  $\Delta(1/n^2)_{ij}$  и тензором деформаций  $S_{kl}$  определяется упругооптическим тензором  $p_{ijkl}$  четвертого ранга. Так как  $(1/n^2)_{ij}$  и  $S_{kl}$  симметричны и безразмерны, то элементы тензора  $p_{ijkl}$  также безразмерны и в силу симметрии по парам индексов  $(ij)$  и  $(kl)$  можно использовать укороченную запись:

$$\Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_i = \sum_{j=1}^6 p_{ij} S_j; \quad i, j = 1, 2, \dots, 6,$$

применяя для пар индексов  $(ij)$  и  $(kl)$  стандартные обо-

значения: 1 вместо (11), 2 вместо (22), 3 вместо (33) и 4, 5, 6 соответственно вместо (23) и (32), (13) и (31), (12) и (21).

Фотоупругие свойства различных веществ для материалов различных точечных групп симметрии (рис. 33.1) приведены в табл. 33.12.

Дифракция света на акустических волнах может быть использована для отклонения пучков оптических лучей (табл. 33.13).

В табл. 33.12 и 33.13 кроме значений  $p_{ij}$  приведены также часто используемые для вычисления свойств материалов коэффициенты акустооптического «качества»  $M_1$ ,  $c^3/\text{г}$ ,  $M_2$ ,  $c^3/\text{г}$ , и  $M_3$ ,  $\text{см} \cdot c^2/\text{г}$ :

$$M_1 = \frac{n^7 p^2}{\rho v^3}; \quad M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3}; \quad M_3 = \frac{n^7 p^2}{\rho v^2},$$

где  $n$  — показатель преломления;  $p$  — компонента тензора фотоупругости;  $\rho$  — плотность вещества и  $v$  — скорость звука в нем.

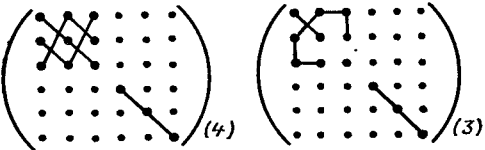
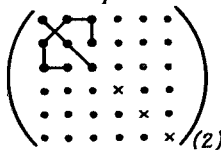
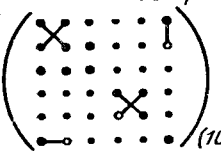
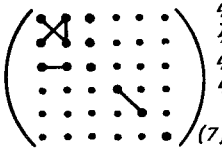
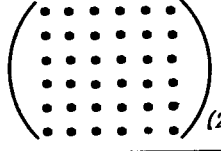
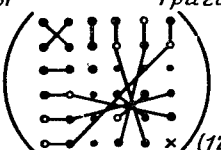
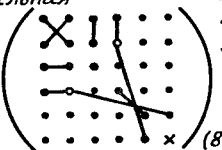
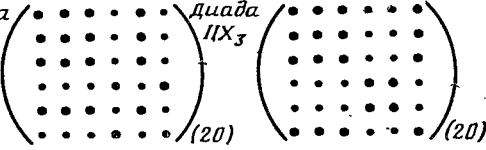
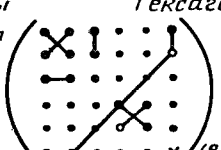
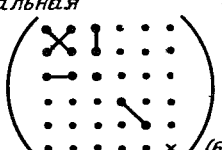
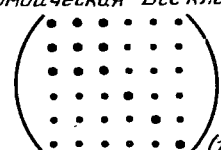
|                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Компонента</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Нулевая</li> <li>• Ненулевая</li> <li>— Равные</li> <li>— Равные, противоположные по знаку</li> <li><math>\times \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12})</math></li> </ul> |                                                                                                                  | <p><i>Кубическая</i></p> <p>Классы 23, <math>m\bar{3}</math>      Классы <math>\bar{4}3m</math>, 432, <math>m\bar{3}m</math></p>  |                                                                                                                                                                                            |
|                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                  | <p><i>Изотропная</i></p>                                                                                                         |                                                                                                                                                                                            |
| <p>Классы 4, <math>\bar{4}</math>, 4/m</p>                                                                                                     | <p><i>Тетрагональная</i></p>  | <p>Классы 4mm, <math>\bar{4}2m</math>, 422, 4/mmm</p>                                                                                                                                                               | <p><i>Триклинная Оба класса</i></p>                                                                    |
| <p>Классы 3, <math>\bar{3}</math></p>                                                                                                          | <p><i>Тригональная</i></p>    | <p>Классы 3m, 32, <math>\bar{3}m</math></p>                                                                                                                                                                         | <p><i>Моноклинные Все классы</i></p> <p>Диада <math>11X_{12}</math>      Диада <math>11X_3</math></p>  |
| <p>Классы 6, <math>\bar{6}</math>, 6/m</p>                                                                                                     | <p><i>Гексагональная</i></p>  | <p>Классы <math>\bar{6}2m</math>, 6mm, 622, 6/mmm</p>                                                                                                                                                               | <p><i>Орторомбическая Все классы</i></p>                                                               |

Рис. 33.1. Форма упругооптических тензоров (по сингониям) [2]



Т а б л и ц а 33.12. Фотоупругие свойства веществ по сингониям [2]

Все измерения выполнены при  $T = 300$  К. Средняя погрешность для  $P_{ij} \pm 5\%$ . Если знак не указан, известен только модуль  $P_{ij}$ . Коэффициент качества  $M_2$  нормирован по плавленому кварцу. Для плавленного кварца  $M_2 = 1,51 \cdot 10^{-18}$  с<sup>3</sup>/г

| Сингония (класс) | Вещество                               | $\lambda$ , мкм | $p_{11}$  | $p_{12}$  | $M_2$ |
|------------------|----------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-------|
| Изотропная       | Кварц плавленый                        | 0,63            | +0,121    | 0,270     | 1,0   |
|                  | As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -стекло | 1,15            | +0,308    | 0,299     | 230   |
|                  | Вода                                   | 0,63            | 0,31      | 0,31      | 106   |
|                  | 33% Ge, 55% Se, 12% As                 | 1,06            | 0,21      | 0,21      | 164   |
|                  | Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 0,63            | —         | —         | 18    |
|                  | Стекла разные                          | 0,59            | 0,09—0,24 | 0,18—0,28 | —     |
|                  | Тяжелый флинт                          | 0,63            | 0,27      | 0,24      | 12,5  |
|                  | PbO · 2Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,63            | —         | —         | 18,5  |
|                  | Люцит                                  | 0,63            | 0,30      | 0,28      | 33    |
|                  | Полистирол                             | 0,63            | 0,30      | 0,31      | 84    |

Продолжение табл. 33.12

| Сингония (класс)               | Вещество                                             | $\lambda$ , мкм | $p_{11}$    | $p_{12}$    | $p_{44}$ | $M_2$ |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|----------|-------|
| Кубическая<br>(43m, 432 и m3m) | GaP                                                  | 0,63            | —0,151      | —0,082      | —0,074   | 29,5  |
|                                | GaAs                                                 | 1,15            | —0,165      | —0,140      | —0,072   | 69    |
|                                | Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG) | 0,63            | —0,029      | +0,009      | —0,061   | 0,048 |
|                                | Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YIG) | 1,15            | 0,025       | 0,073       | 0,041    | 0,22  |
|                                | $\beta$ -ZnS                                         | 0,63            | +0,091      | —0,01       | +0,075   | 2,3   |
|                                | Ge                                                   | 10,6            | +0,27       | +0,235      | +0,125   | 540,0 |
|                                | ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                     | 0,63            | <0,009      | 0,03        | —        | 0,005 |
|                                | SrTiO <sub>3</sub>                                   | 0,63            | 0,13        | 0,095       | 0,072    | 1,1   |
|                                | Y <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub>       | 0,63            | 0,091       | 0,019       | 0,079    | 0,56  |
|                                | Бромид таллия                                        | 0,63            | —           | —           | —        | 118,3 |
|                                | Алмаз                                                | 0,59            | —0,31÷—0,43 | —0,03÷+0,19 | —0,16    | —     |
|                                | LiF                                                  | 0,59            | +0,02       | +0,128      | —0,064   | —     |
|                                | MgO                                                  | 0,59            | —0,32       | —0,08       | —        | —     |
|                                | Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>      | 0,63            | —           | —           | —        | 33    |
|                                | KBr                                                  | 0,59            | +0,22       | +0,171      | —0,026   | —     |
|                                | KCl                                                  | 0,59            | +0,17       | +0,124      | —        | —     |
|                                | KI                                                   | 0,59            | +0,210      | +0,169      | —        | —     |
|                                | NaCl                                                 | 0,59            | +0,110      | +0,153      | —0,010   | —     |
| Кубическая<br>(23 и m3)        | Ba (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                   | 0,63            | 0,15        | 0,29        | 0,02     | 15,0  |
|                                | Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub>                   | 0,63            | —           | —           | —        | 6,6   |
|                                | Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub>                   | 0,63            | —           | —           | —        | 6,0   |
|                                | Pb (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                   | 0,63            | —           | —           | —        | 17,0  |
|                                | NaBrO <sub>3</sub>                                   | 0,59            | 0,185       | 0,213       | —0,0139  | —     |
|                                | NaClO <sub>3</sub>                                   | 0,59            | 0,162       | 0,20        | —0,198   | —     |
|                                |                                                      | 0,59            |             |             |          |       |

| Сингония (класс)                                                                            | Вещество                                                             | $\lambda$ , мкм | $p_{11}$ | $p_{12}$ | $p_{13}$ | $p_{14}$ | $p_{31}$ | $p_{33}$ | $p_{41}$ | $p_{44}$ | $M_2$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Тригональная<br>( $3m$ , $32$ и $\bar{3}m$ )<br><br>( $3$ и $\bar{3}$ )                     | LiTaO <sub>3</sub>                                                   | 0,63            | 0,08     | 0,08     | 0,09     | 0,03     | 0,09     | 0,15     | 0,02     | 0,02     | 0,91  |
|                                                                                             | $\alpha = \text{Al}_2\text{O}_3$                                     | 0,63            | 0,20     | 0,078    | —        | —        | 0        | 0,252    | —        | 0,09     | 0,22  |
|                                                                                             | Te                                                                   | 10,6            | 0,155    | 0,130    | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 2,92  |
|                                                                                             | LiNbO <sub>3</sub> (PE)                                              | 0,63            | —0,02    | +0,08    | +0,13    | —0,08    | +0,17    | +0,07    | —0,15    | +0,12    | 9,0   |
|                                                                                             | Рубин ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,05\% \text{ Cr}$ )                | 0,63            | —0,23    | —0,03    | +0,02    | 0,00     | —0,04    | —0,20    | +0,01    | —0,10    | —     |
|                                                                                             | $\alpha$ -Кварц ( $\text{SiO}_2$ )                                   | 0,59            | +0,128   | +0,25    | +0,259   | —0,029   | +0,258   | +0,098   | —0,042   | —0,0685  | —     |
|                                                                                             | CaCO <sub>3</sub>                                                    | —               | +0,095   | +0,189   | +0,215   | —0,006   | +0,309   | +0,178   | +0,01    | —0,090   | —     |
|                                                                                             | Li <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>                                      | 0,63            | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 2,5   |
| Гексагональная<br>( $\bar{6}m2$ , $6m$ и $622$ и<br>$6/mmm$ )( $6$ , $\bar{6}$ и $6/m$ )    | CdS                                                                  | 0,63            | 0,142    | 0,066    | —        | —        | 0,041    | —        | —        | 0,054    | 8,0   |
|                                                                                             | LiIO <sub>3</sub>                                                    | 0,63            | 0,32     | —        | —        | 0,03     | 0,41     | —        | —        | —        | 8,3   |
| Тетрагональная<br>( $4mm$ , $42m$ ,<br>$422$ и $4/mmm$ )<br><br>( $4$ , $\bar{4}$ и $4/m$ ) | TiO <sub>2</sub> (рутил)                                             | 0,63            | —0,011   | +0,172   | —0,168   | —        | —0,096   | —0,058   | —        | —        | 2,6   |
|                                                                                             | ADP                                                                  | 0,63            | +0,302   | +0,246   | +0,236   | —        | +0,195   | +0,263   | —        | 0,075    | 4,2   |
|                                                                                             | KDP                                                                  | 0,63            | +0,251   | +0,249   | +0,246   | —        | +0,225   | +0,221   | —        | 0,058    | 2,5   |
|                                                                                             | ZrSiO <sub>4</sub>                                                   | 0,63            | 0,06     | —        | 0,13     | —        | 0,07     | 0,09     | —        | 0,10     | 2,4   |
|                                                                                             | TeO <sub>2</sub>                                                     | 0,63            | 0,0074   | +0,187   | +0,340   | —        | +0,090   | +0,240   | —0,17    | —0,046   | 525,0 |
|                                                                                             | Sr <sub>0,75</sub> Ba <sub>0,25</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub> | 0,63            | 0,16     | 0,10     | 0,08     | —        | 0,11     | 0,47     | —        | —        | 26,0  |
|                                                                                             | Sr <sub>0,5</sub> Ba <sub>0,5</sub> Nb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>   | 0,63            | 0,06     | 0,08     | 0,17     | —        | 0,09     | 0,23     | —        | —        | 5,8   |
|                                                                                             | PbMoO <sub>4</sub>                                                   | 0,63            | 0,24     | 0,24     | 0,255    | —        | 0,15     | 0,29     | —        | —        | 23,7  |
|                                                                                             | CdMoO <sub>4</sub>                                                   | 0,63            | 0,12     | 0,10     | 0,13     | —        | 0,11     | 0,18     | —        | —        | 4,5   |
|                                                                                             | PbWO <sub>4</sub>                                                    | —               | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 21,0  |

| Сингония (класс)           | Вещество                                          | $\lambda$ , мкм | $p_{11}$ | $p_{12}$ | $p_{13}$ | $p_{31}$ | $p_{32}$ | $p_{33}$ | $p_{44}$ | $p_{46}$ | $M_2$      |
|----------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| Орторомбическая            | $\alpha$ -HfO <sub>3</sub>                        | 0,63            | 0,406    | 0,277    | 0,304    | 0,279    | 0,343    | 0,310    | 0,334    | —        | 55,0       |
|                            | Ca (NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>               | 0,63            | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 1,3        |
|                            | PbCO <sub>3</sub>                                 | 0,63            | 0,15     | 0,12     | 0,16     | 0,05     | 0,06     | 0,16     | 0,12     | —        | 15,0       |
|                            | Ba <sub>2</sub> NaNb <sub>5</sub> O <sub>15</sub> | —               | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | —        | 5,0 ÷ 10,0 |
| Моноклиная<br>(все классы) | BaSO <sub>4</sub>                                 | 0,59            | +0,21    | +0,25    | +0,16    | +0,34    | +0,24    | +0,22    | +0,31    | —0,012   | —          |
|                            | Pb <sub>2</sub> MoO <sub>5</sub>                  | 0,63            | —        | —        | —        | —        | —        | —        | +0,002   | —        | 27,0       |

Таблица 33.13. Акустооптические свойства веществ [2]

Поляризация света определяется параллельно (||) или перпендикулярно (⊥) плоскости, проходящей через направление распространения световой и акустической волн. Продольная (поперечная) поляризация акустической волны помечена знаком \* (\* \*). Коэффициенты качества нормированы по плавленому кварцу. Коэффициент перевода:  $1,51 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$ . Ослабление звука нарастает с частотой как  $f^x$ , где  $x \geq 1$ . Данные пересчитаны к  $f = 500 \text{ МГц}$  в предположении, что  $x = 2$

| Вещество                                             | Область прозрачности, мкм | $\lambda$ , мкм | $n$  | Направление акустической волны | $v_{\text{зв}}$ , $10^5 \text{ см/с}$ | Поляризация, направление световой волны | $M_1$       | $M_2$       | $M_3$       | Ослабление звука для $f = 500 \text{ МГц}$ , дБ/мкс |
|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------------------------------|
| $\text{H}_2\text{O}$                                 | 0,2—0,9                   | 0,633           | 1,33 | —                              | 1,5                                   | или ⊥                                   | 6,1         | 106         | 24          | 75                                                  |
| $\text{D}_2\text{O}$                                 | 0,2—1,8                   | 0,633           | 3,31 | * [110]<br>* * [100]           | 6,32<br>4,13                          | или ⊥ [010]                             | 75<br>17,4  | 29,5<br>16  | 69<br>25,7  | <1,0<br>—                                           |
| GaP                                                  | 0,6—10,0                  | 10,6            | 4,0  | * [111]<br>* * [100]           | 5,50<br>3,51                          | или ⊥                                   | 1270<br>182 | 540<br>190  | 1380<br>308 | 4,2<br>0,8                                          |
| Ge                                                   | 2—20                      | 0,633           | 1,46 | * *<br>* *                     | 5,96<br>3,76                          | ⊥ или ⊥                                 | 1,0<br>0,12 | 1,0<br>0,31 | 1,0<br>0,2  | 1,8<br>—                                            |
| Кварц плавленый, $\text{SiO}_2$                      | 0,2—4,5                   | 0,633           | 1,98 | * [001]                        | 2,44                                  | ⊥ [010]                                 | 13,6        | 55,0        | 32          | 0,6                                                 |
| $\alpha\text{-HfO}_3$                                | 0,3—1,8                   | 0,633           | 2,20 | * [1120]                       | 6,57                                  | —                                       | 8,3         | 4,6         | 7,5         | <0,03                                               |
| $\text{LiNbO}_3$                                     | 0,5—4,5                   | 0,633           | 2,39 | * [001]                        | 3,66                                  | или ⊥ [100]                             | 15,3        | 23,7        | 24,9        | 1,2                                                 |
| $\text{PbMoO}_4$                                     | 0,4—5,5                   | 0,633           | 2,46 | * [001]                        | 2,6                                   | ⊥                                       | 78,0        | 230         | 182         | 11,0                                                |
| $\text{As}_2\text{S}_3$ -стекло                      | 0,6—11                    | 1,06            | 2,7  | * [1120]                       | 2,52                                  | или ⊥                                   | 53,0        | 164         | 128         | 1,8                                                 |
| $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{65}\text{As}_{22}$ -стекло | 1—14                      | 10,6            | 4,8  | * [001]                        | 2,2                                   | [0001]                                  | 1320        | 2920        | 3550        | —                                                   |
| Te                                                   | 5—20                      | 0,633           | 2,27 | * [110]                        | 4,26                                  | ⊥ [010]                                 | 18,5        | 22,8        | 25,6        | 1,0                                                 |
| $\text{TeO}_2$                                       | 0,35—5,0                  | 0,633           | 2,58 | * * [110]                      | 0,617                                 | или ⊥ [001]                             | 8,8         | 525         | 85,0        | 3,0                                                 |
| $\text{TiO}_2$                                       | 0,45—5,5                  | 0,633           | 2,58 | * [1120]                       | 7,86                                  | ⊥ [0001]                                | 7,9         | 2,6         | 6,2         | —                                                   |

### 33.6. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Способность вещества вращать плоскость поляризации света при прохождении его через вещество называют *естественной оптической активностью*. Естественной оптической активностью обладает большое число кристаллов и их растворов.

Оптическую активность веществ характеризуют удельным вращением  $[\alpha]_{\lambda}^t$ , т. е. углом поворота  $\alpha$  плоскости поляризации света, проходящего через слой вещества толщиной 10 см при температуре  $t$ , °C, длине волны  $\lambda$  и концентрации оптически активного вещества, равной 1 г/см<sup>3</sup>. Для чисто активной жидкости  $[\alpha] = \alpha/(l\rho)$ , для растворов  $[\alpha] = 100\alpha/(lP\rho)$ , где  $\alpha$  — угол поворота, град;  $l$  — толщина слоя, дм;  $\rho$  — плотность, г/см<sup>3</sup>;  $P$  — концентрация оптически активного вещества, г/100 г раствора.

Таблица 33.14. Оптическая активность метиловых эфиров [2]

| Эфир                                                                           | $[\alpha]_D^{20}$ ,<br>град·см <sup>3</sup> /(г·дм) | $[M]_D^{20}$ ,<br>град·см <sup>3</sup> /дм |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| HCO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub>                               | —79,52                                              | —146,3                                     |
| CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub>                | —79,42                                              | —157,3                                     |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub>  | —75,51                                              | —160,2                                     |
| C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub>  | —69,52                                              | —156,9                                     |
| C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub>  | —65,55                                              | —157,3                                     |
| C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> | —62,07                                              | —157,7                                     |
| C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> | —58,85                                              | —155,7                                     |
| C <sub>7</sub> H <sub>15</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> | —55,25                                              | —155,8                                     |
| C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>19</sub> | —53,16                                              | —157,3                                     |

Таблица 33.15. Оптическая активность этилтарtrate в различных растворителях [2]

| Растворитель                                                    | Дипольный момент растворителя $\mu$ , дебай | $[M]_{546,1}^{20}$ нм <sup>*</sup> ,<br>град·см <sup>3</sup> /дм |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| s-C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> | 0                                           | 0                                                                |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OCH <sub>3</sub>                  | 1,16                                        | 5                                                                |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>                                   | 0,4                                         | 7,4                                                              |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>                   | 0                                           | 12,5                                                             |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> I                                 | 1,25                                        | 20,2                                                             |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Br                                | 1,56                                        | 21,8                                                             |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl                                | 1,56                                        | 23,0                                                             |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CN                                | 3,85                                        | 67,9                                                             |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>                   | 3,90                                        | 80,6                                                             |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COH                               | 2,75                                        | 107,7                                                            |
| Чистый этилтарtrate                                             | —                                           | 16,25                                                            |

Таблица 33.16. Удельное вращение кристаллов [2]

| Кристалл                     | Формула                                                            | Класс          | Длина волны, нм | $[\alpha]$ , град/мм  |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| Лития-калия сульфат<br>Кварц | KLiSO <sub>4</sub>                                                 | C <sub>6</sub> | 589             | ±3,43                 |
|                              | SiO <sub>2</sub>                                                   | D <sub>3</sub> | 434             | 41,924                |
|                              |                                                                    |                | 486,1           | 32,761                |
|                              |                                                                    |                | 589,3           | 21,724                |
| Киноварь<br>Натрия хлорат    | HgS                                                                | D <sub>3</sub> | 656,3           | 17,320                |
|                              | NaClO <sub>3</sub>                                                 | T              | 687             | 325                   |
|                              |                                                                    |                | 556             | ±1,42                 |
| Сахар<br>Сегнетова соль      | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>                    | C <sub>2</sub> | 589             | 1,6—5,4* <sup>1</sup> |
|                              | KNaC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> ·4H <sub>2</sub> O | D <sub>2</sub> | 589             | —1,4                  |

\*<sup>1</sup> Для различных направлений.

Молекулярная вращательная способность определяется выражением  $[M] = [\alpha] M/100$  град·см<sup>3</sup>/дм, где  $M$  — молекулярная масса активного вещества, г.

В табл. 33.14—33.16 приведены характеристики оптической активности ряда веществ.

### 33.7. ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В КРИСТАЛЛАХ

Генерация второй гармоники в кристаллах описывается поляризацией среды

$$P_i^{(2\omega)} = \epsilon_0 \sum_{j,k=1,2,3} d_{ijk}^{2\omega} E_j^{(\omega)} E_k^{(\omega)},$$

где коэффициенты  $d_{ijk}^{2\omega}$  образуют тензор третьего ранга. Перестановка компонент поля  $E_j^{(\omega)}$  и  $E_k^{(\omega)}$  не влияет на значение  $P_i$ , поэтому члены тензора  $d_{ijk}^{2\omega}$  удовлетворяют условиям симметрии  $d_{ijk}^{2\omega} = d_{ikj}^{2\omega}$ . В силу этого, как и для тензора пьезооптического эффекта (см. § 33.4), для  $d_{ijk}^{2\omega}$  можно воспользоваться сокращенной записью  $d_{il}^{2\omega}$ , где  $l$  в зависимости от  $j$  и  $k$  пробегает значения от 1 до 6. В сокращенной записи компоненты поляризации среды записываются в матричной форме

$$(P_x, P_y, P_z) = \epsilon_0 \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ E_z^2 \\ 2E_y E_z \\ 2E_x E_z \\ 2E_x E_y \end{bmatrix},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл/(В·м) — электрическая постоянная;  $P$  — поляризация, Кл/м<sup>2</sup>;  $E$  — напряженность электрического поля, В/м;  $d_{il}$  — тензор квадратичной нелинейной восприимчивости, м/В.

Число ненулевых членов в тензоре  $d_{il}^{2\omega}$  зависит от группы точечной симметрии среды. Для различных кристаллических классов вид тензора  $d_{il}^{2\omega}$  приведен в табл. 33.17.

Мощность излучения второй гармоники  $P^\omega$  определяется соотношением

$$P^{2\omega} = \frac{2\epsilon_0^{1/2} \mu_0^{3/2} \omega^2 (d_{il}^{2\omega})^2 (P^\omega)^2 L^2}{\pi r_0^2 n^{2\omega} (n^\omega)^2} f(\Delta k),$$

где  $\omega$  — частота, с<sup>-1</sup>, и  $P^\omega$  — мощность, Вт, исходного излучения;  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  В·с/(А·м) — магнитная постоянная;  $n^\omega$  и  $n^{2\omega}$  — показатели преломления среды для излучения исходной частоты и его второй гармоники;  $L$  — длина пути луча в среде, м;  $r_0$  — радиус луча, м;  $f(\Delta k)$  — функция, описывающая рассогласование волновых векторов исходной световой волны и ее второй гармоники  $k_\omega$  и  $k_{2\omega}$ . В тех случаях, когда выполняется условие синхронизма, т. е.  $2k_\omega = k_{2\omega}$  или  $v(\omega) = v(2\omega)$ ,  $\Delta k = 0$  и  $f(\Delta k) = 1$ . Это возможно только в средах, не обладающих дисперсией. В реальных же средах фазовые скорости  $v(\omega)$  и  $v(2\omega)$  различны, в силу чего  $\Delta k > 0$  и  $f(\Delta k) < 1$ . Более того, при распространении световых волн в среде значение  $\Delta k$  постоянно меняется. Поэтому фазовые соотношения между исходной волной и ее гармоникой сохраняются только на некоторой длине, называемой *когерентной*:

$$l_{\text{ког}} = \frac{\pi}{2(k_{2\omega} - 2k_\omega)}.$$

В кристалле кварца, например,  $l_{\text{ког}}$  всего порядка  $10^{-3}$  см.

Существенное увеличение  $l_{\text{ког}}$  достигается при точном выполнении условий синхронизма в анизотропных кристаллах. В них показатель преломления, а следовательно, и фазовая скорость зависят не только от частоты, но и от поляризации волны, поэтому возможно выполнение условий синхронизма на значительно большей длине. При этом в зависимости от выбора поляризации и ориентации кристалла возможны два типа фазового синхронизма. В отрицательных одноосных кристаллах, где показатель преломления для обыкновенной волны  $n_o$  (волны с поляризацией, перпендикулярной плоскости, проходящей через оптическую ось кристалла и направление луча) больше показателя преломления для необыкновенной волны  $n_e$  (волны с поляризацией, параллельной указанной плоскости), в некотором направлении  $\theta_1$ , отсчитываемом от направления оптической оси кристалла,

$$n_e^{2\omega} = n_o^\omega$$

и в направлении  $\theta_2$

$$n_e^{2\omega} = \frac{1}{2} (n_o^\omega + n_e^\omega).$$

Соответственно для положительных одноосных кристаллов

$$n_o^{2\omega} = n_e^\omega; \quad n_o^{2\omega} = \frac{1}{2} (n_e^\omega + n_o^\omega).$$

Для двухосных кристаллов также возможно выполнение фазового синхронизма. Однако и для тех, и для других кристаллов само по себе наличие анизотропии показателя преломления недостаточно. Необходимо, чтобы соответствующие поверхности показателей преломления для исходной длины волны и ее гармоники по крайней мере касались друг друга, т. е. чтобы анизотропия была достаточно большой.

Когерентная длина  $l_{\text{ког}}$  в реальных условиях эксперимента не обращается в бесконечность, как этого следовало бы ожидать при выполнении условия синхронизма. Расходимость реальных световых пучков приводит к тому, что часть лучей отклоняется от направления синхронизма, даже если ось пучка точно направлена по этому направлению.

Синхронизм называют *критическим*, если направление фазового синхронизма  $\theta$  отличается от  $90^\circ$ , и *некритическим*, если  $\theta = 90^\circ$ . В первом случае поверхности показателей преломления для исходной волны и ее гармоники пересекаются, что соответствует различию в направлениях для групповых скоростей (векторов Пойнтинга) обыкновенной и необыкновенной волн. Во втором направлении групповых скоростей коллинеарны (поверхности показателей преломления касаются). Переход от критического синхронизма к некритическому можно осуществить выбором температуры кристалла.

Коэффициенты генерации второй гармоники (элементы тензора  $d_{il}^{2\omega}$ ) нелинейных кристаллов приведены в табл. 33.18. Элементы тензора  $d_{ijk}^{2\omega}$  связаны с линейными оптическими восприимчивостями сред через тензор третьего ранга  $\delta_{ijk}^{2\omega}$  (тензор Миллера)\*1.

$$d_{ijk}^{2\omega} = \epsilon_0 \chi_{ii}^{2\omega} \chi_{jj}^\omega \chi_{kk}^\omega \delta_{ijk}^{2\omega},$$

где  $\delta_{ijk}^{2\omega}$  — в м<sup>2</sup>/Кл;  $\chi_{il}$  — безразмерные величины;  $d_{ijk}^{2\omega}$  — в м/В. Значения  $\delta_{il}^{2\omega}$  также приведены в табл. 33.18. Характерным является то, что вариации элементов тензора  $\delta_{il}^{2\omega}$  от вещества к веществу значительно меньше, чем вариации для  $d_{il}^{2\omega}$ .

Так как абсолютные или относительные знаки коэффициентов второй гармоники определены только для некоторых кристаллов, то они вынесены в отдельную табл. 33.19.

\*1 Соотношение справедливо для кристаллов с симметрией, отличной от триклинной и моноклинной.

Таблица 33.17. Форма тензора генерации второй гармоники для различных кристаллографических классов [2]

Продолжение табл. 33.17

| Сингония       | Класс         | Форма тензора                                                                                                                                                                                     | Примечание      | Сингония       | Класс              | Форма тензора                                                                                                                                                                 | Примечание                       |
|----------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Триклинная     | $1-C_1$       | $\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix}$ | —               | Тригональная   | $3-C_3$            | $\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & -d_{14} & -d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ | —                                |
| Моноклинная    | $m-C_s$       | $\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$                                         | $m \perp Z$     | Тригональная   | $3m-C_{3v}$        | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                             | $m \perp X$                      |
|                | $m-C_s$       | $\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$                                         | $m \perp Y$     |                | $3m-C_{3v}$        | $\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & -d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                             | $m \perp Y$                      |
|                | $2-C_2$       | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$                                                   | $2 \parallel Z$ |                | $32-D_3$           | $\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                           | —                                |
|                | $2-C_2$       | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$                                                   | $2 \parallel Y$ | Гексагональная | $\bar{6}-C_{3h}$   | $\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                     | —                                |
| Ромбическая    | $mm2-C_{2v}$  | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                                                  | —               |                | $6-C_6$            | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                   | Совпадает с классом $4-C_4$      |
|                | $222-D_2$     | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$                                                                            | —               |                | $\bar{6}m2-D_{3h}$ | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                                      | $m \perp X$                      |
| Тетрагональная | $4-C_4$       | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                                       | —               |                | $\bar{6}m2-D_{3h}$ | $\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                                      | $m \perp Y$                      |
|                | $\bar{4}-S_4$ | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{15} & d_{14} & 0 \\ d_{31} & -d_{31} & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$                                                      | —               |                | $6mm-C_{6v}$       | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                              | Совпадает с классом $4mm-C_{4v}$ |
|                | $4mm-C_{4v}$  | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$                                                                            | —               |                | $622-D_6$          | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                                            | Совпадает с классом $422-D_4$    |
|                | $42m-D_{2d}$  | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$                                                                            | —               | Кубическая     | $23-T$             | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$                                                        | —                                |
|                | $422-D_4$     | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$                                                                                | —               |                | $\bar{4}3m-T_d$    | $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$                                                        | —                                |
|                |               |                                                                                                                                                                                                   |                 |                | $432-O$            | Все члены тензора равны нулю                                                                                                                                                  | —                                |

Таблица 33.18. Коэффициенты генерации второй гармоники по сингониям [2]

| Сингония, вещество                                                                                    | Класс        | $d_{il}^{2\omega}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                                                                                                                         | $\delta_{il}^{2\omega}$ , $10^{-2}$ м²/К                                                                                                                                                       | $\lambda_1$ , мкм                                        | $n^\omega$                                              | $n^{2\omega}$ ( $\theta$ , град)                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Моноклинная:</b>                                                                                   |              |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                |                                                          |                                                         |                                                        |
| лития сульфата моногидрат<br>$\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$                        | $2-C_2$      | $d_{16} = (?)$<br>$d_{21} = (?)$<br>$d_{22} = 0,46 \pm 0,07$<br>$d_{23} = 0,33 \pm 0,05$<br>$d_{34} = 0,29 \pm 0,04$                                                                                        | —<br>—<br>—<br>—<br>—                                                                                                                                                                          | 1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>1,152            | 1,4636<br>1,4521<br>1,4657<br>1,4752<br>1,4704          | 1,4624<br>1,4868<br>1,4868<br>1,4868<br>1,4769 (25)    |
| калия битартрата гидрат<br>$\text{K}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$     | $2-C_2$      | $d_{21} = 0,13$<br>$d_{22} = 4,26$<br>$d_{23} = 0$<br>$d_{25} = 0,19$                                                                                                                                       | 0,68<br>19,2<br>0<br>0,93                                                                                                                                                                      | 0,6943<br>0,6942<br>0,6942<br>1,152                      | 1,4893<br>1,5194<br>1,5294<br>1,5043                    | 1,5693<br>1,5693<br>1,5693<br>1,5693 (20; 40)          |
| триглицидсульфат (TGS)<br>$(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$         | $2-C_2$      | $d_{23} = 0,33$                                                                                                                                                                                             | 1,09                                                                                                                                                                                           | 0,6943                                                   | 1,567                                                   | 1,618                                                  |
| <b>Ромбическая:</b>                                                                                   |              |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                |                                                          |                                                         |                                                        |
| аммония биоксалата моногидрат<br>$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$       | $222-D_2$    | $d_{14} = 0,43$<br>$\frac{1}{2}(d_{25} + d_{36}) =$<br>$= (0,78 \pm 0,07)$                                                                                                                                  | $\delta_{14} = 2,2$<br>—                                                                                                                                                                       | 1,06<br>1,06                                             | 1,4802<br>—                                             | 1,5996<br>—                                            |
| гадолиния молибдат<br>$\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$                                                   | $mm2-C_{2v}$ | $d_{15} = 2,98 \pm 0,45$<br>$d_{24} = 2,93 \pm 0,44$<br>$d_{31} = 2,83 \pm 0,42$<br>$d_{32} = 2,75 \pm 0,41$<br>$d_{33} = 0,05 \pm 0,009$<br>$d_{36} = 2,85$                                                | $\delta_{15} = 2,44 \pm 0,37$<br>$\delta_{24} = 2,4 \pm 0,36$<br>$\delta_{31} = 2,30 \pm 0,34$<br>$\delta_{32} = 2,24 \pm 0,34$<br>$\delta_{33} = 0,04 \pm 0,007$<br>$\delta_{14} = 7,16$      | 1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>0,6943 | 1,8386<br>1,8384<br>1,8146<br>1,8142<br>1,8637<br>1,644 | 1,8549<br>1,8545<br>1,9102<br>1,9102<br>1,9102<br>1,61 |
| гиппуровая кислота<br>$\text{C}_6\text{H}_5\text{CO} \cdot \text{NH}(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H})$ | $222-D_2$    | $d_{14} = 7,28 \pm 1,8$                                                                                                                                                                                     | $\delta_{14} = 4,43 \pm 1,09$                                                                                                                                                                  | 1,064                                                    | 1,9391                                                  | 1,8547<br>(24; 41,5)                                   |
| $\alpha$ -HIO <sub>3</sub>                                                                            |              |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                |                                                          |                                                         |                                                        |
| калия дигидрофосфат<br>(KDP) $\text{KH}_2\text{PO}_4$ при $T < -150^\circ\text{C}$                    | $mm2-C_{2v}$ | $d_{14} = 4,83 \pm 0,9$<br>$d_{15} = 0,57 \pm 0,05$<br>$d_{24} = 0,38 \pm 0,05$<br>$d_{31} = 0,58 \pm 0,05$<br>$d_{32} = 0,39 \pm 0,05$<br>$d_{33} = 0$                                                     | $\delta_{14} = 3,02 \pm 0,56$<br>$\delta_{15} = 3,3 \pm 0,3$<br>$\delta_{24} = 2,2 \pm 0,3$<br>$\delta_{31} = 3,4 \pm 0,3$<br>$\delta_{32} = 2,3 \pm 0,3$<br>$\delta_{33} = 0$                 | 1,1526<br>0,6943<br>0,6943<br>0,6943<br>0,6943<br>—      | 1,935<br>1,4906<br>1,4906<br>1,5117<br>1,5117<br>1,4694 | 1,845<br>1,540<br>1,540<br>1,4917<br>1,4917<br>1,4917  |
| литий метагадолиниевый-кислый<br>$\text{LiGdO}_2$                                                     | $mm2-C_{2v}$ | $d_{15} = d_{31} =$<br>$= 0,08 \pm 0,009$<br>$d_{24} = d_{32} = 0,175 \pm 0,019$<br>$d_{33} = 0,686 \pm 0,07$                                                                                               | $0,1 \pm 0,01$<br>$0,25 \pm 0,027$<br>$\delta_{33} = 0,88 \pm 0,09$<br>$\delta_{11} = 1,33 \pm 0,24$                                                                                           | 1,0642<br>1,0642<br>1,0642                               | 1,7433<br>1,7131<br>1,7399                              | 1,7705<br>1,7705<br>1,5229                             |
| лития формиата моногидрат<br>$\text{LiCHO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$                                | $mm2-C_{2v}$ | $d_{15} = d_{31} =$<br>$= (0,11 \pm 0,02)$<br>$d_{24} = d_{32} =$<br>$= 1,27 \pm 0,09$<br>$d_3 = 1,86 \pm 0,11$<br>$d_{15} = 14,56 \pm 0,73$<br>$d_{24} = 13,83 \pm 0,73$<br>$d_{31} = 14,56 \pm 0,73$      | $\delta_{32} = 8,19 \pm 0,6$<br>$\delta_{33} = 10,03 \pm 0,6$<br>$\delta_{15} = 2,35 \pm 0,11$<br>$\delta_{24} = 2,23 \pm 0,11$<br>$\delta_{31} = 2,42 \pm 0,12$                               | 1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>1,0642                     | 1,4673<br>1,5035<br>2,2133<br>2,2140                    | 1,5229<br>(81—95)<br>1,5229 (55,1)                     |
| натрия-бария ниобат<br>$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$                                        | $mm2-C_{2v}$ | $d_{32} = 14,56 \pm 1,46$<br>$d_{33} = 20 \pm 1,46$<br>$d_{31} = d_{15} = 0,2$<br>$d_{32} = d_{24} = 0,87$                                                                                                  | $\delta_{32} = 2,41 \pm 0,16$<br>$\delta_{33} = 4,06 \pm 0,30$<br>0,88<br>15,73                                                                                                                | 1,0642<br>1,0642<br>1,153<br>1,153                       | 2,2580<br>2,1700<br>1,629<br>1,3391                     | 2,2502<br>(73—75)<br>2,2502<br>1,4124                  |
| натрия нитрит $\text{NaNO}_3$                                                                         | $mm2-C_{2v}$ | $d_{31} = d_{15} = 0,2$<br>$d_{32} = d_{24} = 0,87$                                                                                                                                                         | $\delta_{31} = 1,9$<br>$\delta_{32} = 0$                                                                                                                                                       | 1,064<br>1,064                                           | —<br>—                                                  | $\approx 1,43$                                         |
| поливинилиденфторид<br>$(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n$                                                   | $mm2-C_{2v}$ | $d_{31} \approx 0,18$<br>$d_{32} \approx 0$<br>$d_{33} \approx 0,36$<br>$d_{15} = 6,7 \pm 1,0$<br>$d_{24} = 6,17 \pm 0,93$<br>$d_{31} = 7,4 \pm 1,1$<br>$d_{32} = 6,68 \pm 1,00$<br>$d_{33} = 10,1 \pm 1,5$ | $\delta_{31} \approx 3,8$<br>$\delta_{15} = 0,84 \pm 0,12$<br>$\delta_{24} = 0,76 \pm 0,11$<br>$\delta_{31} = 0,93 \pm 0,14$<br>$\delta_{32} = 0,83 \pm 0,12$<br>$\delta_{33} = 1,19 \pm 0,18$ | 1,064<br>1,064<br>1,064<br>1,064<br>1,064<br>1,064       | —<br>—<br>—<br>2,3115<br>2,3131<br>2,2979<br>2,3010     | —<br>—<br>—<br>2,4113<br>2,4137<br>2,4396<br>2,4396    |
| свинца ниобат $\text{PbNb}_4\text{O}_{11}$                                                            | $mm2-C_{2v}$ | $d_{14} = 0,45 \pm 0,07$<br>$d_{25} = 0,49 \pm 0,07$<br>$d_{36} = 0,46 \pm 0,07$                                                                                                                            | $\delta_{14} = 1,72 \pm 0,27$<br>$\delta_{25} = 1,86 \pm 0,27$<br>$\delta_{36} = 1,74 \pm 0,27$                                                                                                | 1,0642<br>1,0642<br>1,0642                               | 1,5821<br>1,5471<br>1,5440                              | 1,5243<br>1,5965<br>1,6043                             |
| $d$ -треонин                                                                                          | $222-D_2$    |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                |                                                          |                                                         |                                                        |

| Сингония, вещество                                                   | Класс        | $d_{il}^{2\omega}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                                                                                                                              | $\delta_{il}^{2\omega}$ , $10^{-2}$ м <sup>2</sup> /К                                                                                                                                                                            | $\lambda_1$ , мкм                                               | $n^{\omega}$                                                       | $n^{2\omega}$ ( $\theta$ , град)                                   |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| тербия молибдат<br>$Tb_2(MoO_4)_3$                                   | $mm2-C_{2v}$ | $d_{15} = 2,87 \pm 0,43$<br>$d_{24} = 2,9 \pm 0,4$<br>$d_{31} = 2,6 \pm 0,4$<br>$d_{32} = 2,52 \pm 0,38$<br>$d_{33} = 0,12 \pm 0,03$                                                                             | $\delta_{15} = 2,26 \pm 0,34$<br>$\delta_{24} = 2,33 \pm 0,32$<br>$\delta_{31} = 2,08 \pm 0,32$<br>$\delta_{32} = 1,98 \pm 0,30$<br>$\delta_{33} = 0,08 \pm 0,02$                                                                | 1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>1,0642<br>1,0642                  | 1,8459<br>1,8458<br>1,8226<br>1,8222<br>1,8704                     | 1,8649<br>1,8645<br>1,9185<br>1,9185<br>1,9185                     |
| Тригональная:<br>алюминия фосфат<br>$AlPO_4$                         | $32-D_3$     | $d_{11} = (0,41 \pm 0,03)$<br>$d_{14} \approx 0,009$                                                                                                                                                             | $\delta_{11} = 2,07 \pm 0,15$<br>$\delta_{14} = 0,046$                                                                                                                                                                           | 1,0582<br>1,0582                                                | 1,5156<br>1,5198                                                   | 1,5275<br>1,5275                                                   |
| бензил<br>$C_6H_5COCOC_6H_5$                                         | $32-D_3$     | $d_{11} = (4,08 \pm 0,55)$                                                                                                                                                                                       | $\delta_{11} = 9,36 \pm 1,26$                                                                                                                                                                                                    | 1,0642                                                          | 1,6313                                                             | 1,669                                                              |
| калия дитионат<br>$K_2S_2O_4$                                        | $32-D_3$     | $d_{11} = 0,087 \pm 0,015$                                                                                                                                                                                       | $\delta_{11} = 0,69 \pm 0,12$                                                                                                                                                                                                    | 0,6943                                                          | 1,4518                                                             | 1,4728                                                             |
| $\alpha$ -кварц<br>$\alpha-SiO_2$                                    | $32-D_3$     | $d_{11} = (0,4 \pm 0,02)$<br>$d_{14} = 0,009$<br>$d_{11} = 0,364 \pm 0,04$                                                                                                                                       | $\delta_{11} = 1,86 \pm 0,9$<br>$\delta_{14} = 0,14$<br>$\delta_{11} = 1,6 \pm 0,2$                                                                                                                                              | 1,0582<br>1,0582<br>1,0642                                      | 1,532<br>1,536<br>1,5341                                           | 1,542<br>1,542<br>1,5468                                           |
| лития ниобат<br>$LiNbO_3$                                            | $3m-C_{3v}$  | $d_{22} = (3,07 \pm 0,28)$<br>$d_{31} = (5,82 \pm 0,85)$<br>$d_{33} = (40,68 \pm 10,4)$<br>$d_{31} = (5,01 \pm 0,47)$<br>$d_{22} = (2,41 \pm 0,95)$<br>$d_{15} = (6,28 \pm 0,63)$<br>$d_{33} = (30,27 \pm 7,57)$ | $\delta_{22} = 0,497 \pm 0,045$<br>$\delta_{31} = 1,04 \pm 0,15$<br>$\delta_{33} = 8,7 \pm 2,2$<br>$\delta_{31} = 0,92 \pm 0,09$<br>$\delta_{22} = 0,4 \pm 0,16$<br>$\delta_{15} = 1,18 \pm 0,12$<br>$\delta_{33} = 6,7 \pm 1,7$ | 1,0582<br>1,0582<br>1,0582<br>1,152<br>1,152<br>0,6328<br>1,152 | 2,2322<br>2,2322<br>2,1544<br>2,2278<br>2,2278<br>2,1854<br>2,1506 | 2,3241<br>2,2325<br>2,2325<br>2,2153<br>2,3037<br>2,2854<br>2,2153 |
| лития танталат<br>$LiTaO_3$                                          | $3m-C_{3v}$  | $d_{22} = (2,08 \pm 0,24)$<br>$d_{31} = (1,28 \pm 0,24)$<br>$d_{33} = (19,39 \pm 2,36)$                                                                                                                          | $\delta_{22} = 0,48 \pm 0,06$<br>$\delta_{31} = 0,29 \pm 0,06$<br>$\delta_{33} = 4,4 \pm 0,53$                                                                                                                                   | 1,0582<br>1,0582<br>1,0582                                      | 2,1366<br>2,1366<br>2,1406                                         | 2,2043<br>2,2089<br>2,2089                                         |
| пираргирит<br>$Ag_3SbS_3$                                            | $3m-C_{3v}$  | $d_{31} = (12,6 \pm 4)$                                                                                                                                                                                          | $\delta_{31} = 0,58 \pm 0,18$                                                                                                                                                                                                    | 10,6                                                            | 2,7352                                                             | 2,6221<br>(29 $\pm$ 1)                                             |
| прустит<br>$Ag_3AsS_3$                                               | $3m-C_{3v}$  | $d_{22} = (13,4 \pm 4)$<br>$d_{31} = (15,08 \pm 2,2)$<br>$d_{15} + d_{22} = (28,38 \pm 1,8)$                                                                                                                     | $\delta_{22} = 0,55 \pm 0,16$<br>$\delta_{31} = 0,64 \pm 0,09$<br>—                                                                                                                                                              | 10,6<br>1,152<br>10,6                                           | 2,7352<br>2,8042<br>~2,697                                         | 2,758<br>2,5731 (90)<br>~2,728<br>(22,5 $\pm$ 5)                   |
| ртути сульфид<br>$\alpha-HgS$                                        | $32-D_3$     | $d_{11} = 50,3 \pm 17$                                                                                                                                                                                           | $\delta_{11} = 2,93 \pm 1$                                                                                                                                                                                                       | 10,6                                                            | 2,596                                                              | 2,624                                                              |
| селен<br>Se                                                          | $32-D_3$     | $d_{11} = 79,6 \pm 42$                                                                                                                                                                                           | $\delta_{11} = 4,2 \pm 2,2$                                                                                                                                                                                                      | 10,6                                                            | 2,64                                                               | 2,645 (10)                                                         |
| теллур<br>Te                                                         | $32-D_3$     | $d_{11} = (5319,8 + 837,7)$                                                                                                                                                                                      | $\delta_{11} = 1,07 \pm 0,17$                                                                                                                                                                                                    | 10,5915                                                         | 6,243                                                              | 6,305<br>(14,16)                                                   |
| турмалин                                                             | $3m-C_{3v}$  | $d_{15} = 0,27 \pm 0,04$<br>$d_{22} = 0,08 \pm 0,01$<br>$d_{31} = 0,16 \pm 0,03$<br>$d_{33} = 0,57 \pm 0,07$                                                                                                     | $\delta_{15} = 0,70 \pm 0,1$<br>$\delta_{22} = 0,22 \pm 0,03$<br>$\delta_{31} = 0,42 \pm 0,08$<br>$\delta_{33} = 1,58 \pm 0,19$                                                                                                  | —<br>—<br>—<br>—                                                | 1,618<br>1,6274<br>1,6274<br>1,6088                                | 1,6433<br>1,6433<br>1,6231<br>1,6231                               |
| Тетрагональная:<br>аммония дигидрофос-<br>фат (ADP)<br>$NH_4H_2PO_4$ | $42m-D_{2d}$ | $d_{14} = 0,553 \pm 0,024$<br>$d_{36} = 0,558 \pm 0,028$                                                                                                                                                         | $\delta_{14} = 3,19 \pm 0,14$<br>$\delta_{36} = 3,27 \pm 0,16$                                                                                                                                                                   | 1,0582<br>1,0582                                                | 1,4874<br>1,5067                                                   | 1,5277<br>1,4816<br>(41,9 $\pm$ 1)                                 |
|                                                                      |              | $d_{14} = 0,482 \pm 0,024$<br>$d_{36} = 0,487 \pm 0,028$                                                                                                                                                         | $\delta_{14} = 2,52 \pm 0,12$<br>$\delta_{36} = 2,57 \pm 0,15$                                                                                                                                                                   | 0,6943<br>0,6943                                                | 1,4973<br>1,5193                                                   | 1,5498<br>1,5004<br>(51,9 $\pm$ 1)                                 |
|                                                                      |              | $d_{36} = 0,544 \pm 0,14$<br>$d_{36} = 0,57 \pm 0,068$<br>$d_{36} = 0,66 \pm 0,14$<br>$d_{36} = 0,52 \pm 0,08$                                                                                                   | $\delta_{36} = 3,25 \pm 0,84$<br>$\delta_{36} = 2,93 \pm 0,35$<br>$\delta_{36} = 3,65 \pm 0,77$<br>$\delta_{36} = 2,88 \pm 0,44$                                                                                                 | 1,15<br>0,6328<br>0,8250<br>0,6943                              | 1,50364<br>1,5217<br>1,5145<br>1,5138                              | 1,4794<br>1,5075<br>1,4907 (42)<br>1,4926 (47)                     |
| аммония дидейтерофос-<br>фат (ADDP)<br>$ND_4D_2PO_4$                 | $42m-D_{2d}$ |                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                 |                                                                    |                                                                    |
| бария титанат<br>$BaTiO_3$                                           | $4mm-C_{4v}$ | $d_{15} = 17,2 \pm 1,42$<br>$d_{31} = 17,97 \pm 1,42$<br>$d_{33} = 6,6 \pm 0,5$<br>$d_{15} = 19,33 \pm 2,0$<br>$d_{31} = 17,85 \pm 2,0$<br>$d_{33} = 7,79 \pm 1,17$                                              | $\delta_{15} = 1,98 \pm 0,16$<br>$\delta_{31} = 2,11 \pm 0,17$<br>$\delta_{33} = 0,85 \pm 0,06$<br>$\delta_{15} = 2,23 \pm 0,23$<br>$\delta_{31} = 2,10 \pm 0,23$<br>$\delta_{33} = 1,0 \pm 0,15$                                | 1,058<br>1,058<br>1,058<br>1,0642<br>1,0642<br>1,0642           | —<br>—<br>—<br>2,3175<br>2,3379<br>2,2970                          | —<br>—<br>—<br>2,4760<br>2,4128<br>2,4128                          |





| Сингония, вещество                                          | Класс               | $d_{it}^{2\omega}$ , $10^{-12}$ м/В                                                                                  | $\delta_{it}^{2\omega}$ , $10^{-2}$ м <sup>2</sup> /К                                                                                                   | $\lambda_1$ , мкм                                    | $n^\omega$                              | $n^{2\omega}$ ( $\theta$ , град)                |
|-------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| лития иодат<br>LiIO <sub>3</sub>                            | 6—C <sub>6</sub>    | $d_{31} = 5,2 \pm 0,7$<br>$d_{31} = 5,6 \pm 0,3$<br>$d_{33} = 5,86 \pm 0,36$<br>$d_{31} = 7,5 \pm 1,1$               | $\delta_{31} = 4,8 \pm 0,65$<br>$\delta_{31} = 5,05 \pm 0,3$<br>$\delta_{33} = 8,37 \pm 0,51$<br>$\delta_{31} = 6,79 \pm 1,0$                           | 1,0845<br>1,0642<br>1,0642<br>0,5145                 | 1,856<br>1,86<br>1,719<br>1,7876        | 1,746 (28,9)<br>1,750 (30,2)<br>1,750<br>1,9018 |
| лития-калия сульфат<br>LiKSO <sub>4</sub>                   | 6—C <sub>6</sub>    | $d_{31} = 0,38$<br>$d_{33} = 0,71$                                                                                   | $\delta_{31} = (?)$<br>$\delta_{33} = (?)$                                                                                                              | 0,6943<br>0,6943                                     | —<br>—                                  | —<br>—                                          |
| цинка окись<br>ZnO                                          | 6mm—C <sub>6v</sub> | $d_{15} = 2,32 \pm 0,2$<br>$d_{31} = 2,1 \pm 0,2$<br>$d_{33} = 7,0 \pm 0,2$                                          | $\delta_{15} = 1,08 \pm 0,09$<br>$\delta_{31} = 0,98 \pm 0,09$<br>$\delta_{33} = 3,16 \pm 0,09$                                                         | 1,0582<br>1,0582<br>1,0582                           | 1,947<br>1,939<br>1,955                 | 2,031<br>2,048<br>2,048                         |
| цинка сульфид<br>ZnS                                        | 6mm—C <sub>6v</sub> | $d_{33} = 13,5 \pm 0,8$<br>$d_{15} = 21,4 \pm 8,4$<br>$d_{31} = 18,85 \pm 6,3$<br>$d_{33} = 37,3 \pm 12,6$           | $\delta_{33} = 1,74 \pm 0,1$<br>$\delta_{15} = 3,42 \pm 1,34$<br>$\delta_{31} = 3,01 \pm 1,0$<br>$\delta_{33} = 5,89 \pm 1,99$                          | 1,058<br>10,6<br>10,6<br>10,6                        | 2,299<br>2,266<br>2,264<br>2,269        | 2,403<br>2,265<br>2,270<br>2,270                |
| <b>Кубическая:</b>                                          |                     |                                                                                                                      |                                                                                                                                                         |                                                      |                                         |                                                 |
| алюминия антимонид<br>AlSb                                  | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 49 \pm 36$                                                                                                 | $\delta_{14} = 0,4 \pm 0,29$                                                                                                                            | 1,058                                                | 3,3                                     | 3,87                                            |
| висмута германат<br>Bi <sub>4</sub> GeO <sub>12</sub>       | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 1,46$                                                                                                      | $\delta_{14} = 0,47$                                                                                                                                    | 1,0642                                               | 2,0443                                  | 2,1152                                          |
| галлия антимонид<br>GaSb                                    | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 628 \pm 63$                                                                                                | $\delta_{14} = 2,84 \pm 0,28$                                                                                                                           | 10,6                                                 | 3,8                                     | 3,82                                            |
| галлия арсенид<br>GaAs                                      | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 274 \pm 66$<br>$d_{36} = 249 \pm 15$<br>$d_{14} = 188,5 \pm 19$<br>$d_{14} = 140 \pm 10$<br>$d_{14} = 137$ | $\delta_{14} = 1,4 \pm 0,34$<br>$\delta_{36} = 1,27 \pm 0,08$<br>$\delta_{14} = 2,26 \pm 0,23$<br>$\delta_{14} = 0,72 \pm 0,05$<br>$\delta_{14} = 0,31$ | 1,0582<br>1,058<br>10,6<br>1,06<br>0,8435—<br>0,8450 | 3,479<br>3,479<br>3,27<br>3,478<br>3,60 | 4,352<br>4,352<br>3,30<br>4,346<br>5,90         |
| галлия фосфид<br>GaP                                        | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 85,6 \pm 14,2$<br>$d_{36} = 41,2 \pm 2,5$<br>$d_{14} = 35,0$<br>$d_{14} = 109$                             | $\delta_{14} = 1,14 \pm 0,19$<br>$\delta_{36} = 0,55 \pm 0,03$<br>$\delta_{14} = 0,73$<br>$\delta_{14} = 1,9$                                           | 1,058<br>1,058<br>3,39<br>10,6                       | 3,10<br>3,10<br>3,018<br>3,00           | 3,49<br>3,49<br>3,04<br>3,01                    |
| индия антимонид<br>InSb                                     | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 520 \pm 47$                                                                                                | $\delta_{14} = 1,8$                                                                                                                                     | 1,058                                                | —                                       | —                                               |
| индия арсенид<br>InAs                                       | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 364 \pm 47$<br>$d_{14} = 418,9 \pm 12,6$                                                                   | $\delta_{14} = (?)$<br>$\delta_{14} = 3,27 \pm 0,1$                                                                                                     | 1,058<br>10,6                                        | —<br>3,49                               | —<br>3,54                                       |
| индия фосфид<br>InP                                         | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 167,0$                                                                                                     | $\delta_{14} = 0,94$                                                                                                                                    | 1,058                                                | 3,44                                    | 4,24                                            |
| кадмия теллурид<br>CdTe                                     | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 16,7 \pm 6,3$                                                                                              | $\delta_{14} = 0,76 \pm 0,29$                                                                                                                           | 10,6                                                 | 2,69                                    | 2,71                                            |
| меди бромид<br>CuBr                                         | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 7,96 \pm 2,7$<br>$d_{14} = 15,3 \pm 6,9$                                                                   | $\delta_{14} = 3,73 \pm 1,27$<br>$\delta_{14} = 5,07 \pm 2,28$                                                                                          | 10,6<br>1,064                                        | 1,970<br>2,011                          | 1,972<br>2,164                                  |
| меди хлорид<br>CuCl                                         | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 4,19$<br>$d_{14} = 9,1 \pm 4,1$                                                                            | $\delta_{14} = 2,74$<br>$\delta_{14} = 4,64 \pm 2,09$                                                                                                   | 10,6<br>1,064                                        | 1,893<br>1,923                          | 1,895<br>2,012                                  |
| меди иодид<br>CuI                                           | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 7,96 \pm 2,6$<br>$d_{14} = 30,2 \pm 13,6$                                                                  | $\delta_{14} = 1,72 \pm 0,56$<br>$\delta_{14} = 4,65 \pm 2,09$                                                                                          | 10,6<br>1,064                                        | 2,176<br>2,223                          | 2,178<br>2,392                                  |
| натрия бромат<br>NaBrO <sub>3</sub>                         | 23—T                | $d_{14} = 0,28$                                                                                                      | $\delta_{14} = 0,71$                                                                                                                                    | 0,6943                                               | 1,611                                   | 1,661                                           |
| натрия хлорат<br>NaClO <sub>3</sub>                         | 23—T                | $d_{14} = 0,69$                                                                                                      | $\delta_{14} = 3,43$                                                                                                                                    | 0,6943                                               | 1,512                                   | 1,540                                           |
| уротропин<br>N <sub>4</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{14} = 4,73$                                                                                                      | $\delta_{14} = 15,7$                                                                                                                                    | 1,06                                                 | 1,577                                   | 1,593                                           |
| цинка селенид<br>ZnSe                                       | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{36} = 31,7 \pm 1,95$<br>$d_{14} = 78,3 \pm 29,3$                                                                 | $\delta_{36} = 2,21 \pm 0,14$<br>$\delta_{14} = 7,6 \pm 3$                                                                                              | 1,058<br>10,6                                        | 2,48<br>2,42                            | 2,66<br>2,43                                    |
| цинка сульфид<br>$\beta$ -ZnS                               | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{36} = 24,6 \pm 1,5$<br>$d_{14} = 30,6 \pm 8,4$                                                                   | $\delta_{36} = 3,2 \pm 0,19$<br>$\delta_{14} = 5,08 \pm 1,39$                                                                                           | 1,058<br>10,6                                        | 2,289<br>2,25                           | 2,40<br>2,26                                    |
| цинка теллурид<br>ZnTe                                      | $\bar{4}3m—T_d$     | $d_{36} = 106,7 \pm 6,6$<br>$d_{14} = 94,6 \pm 9,5$<br>$d_{14} = 92,1 \pm 33,5$                                      | $\delta_{36} = 2,96 \pm 0,18$<br>$\delta_{14} = 2,62 \pm 0,26$<br>$\delta_{14} = 4,19 \pm 1,5$                                                          | 1,058<br>1,058<br>10,6                               | 2,772<br>2,772<br>2,69                  | 3,182<br>3,182<br>2,70                          |

Таблица 33.19. Знаки коэффициентов генерации второй гармоники [2]

| Вещество            | $d_{11}$ | $d_{14}$ | $d_{22}$ | $d_{31}$ | $d_{32}$ | $d_{33}$ | Вещество                  | $d_{11}$ | $d_{14}$ | $d_{22}$ | $d_{31}$ | $d_{32}$ | $d_{33}$ |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Бария-натрия ниобат |          |          |          | —        | —        | —        | Лития формиата моногидрат |          |          |          |          | —        | +        |
| Бария титанат       |          |          |          | —        | —        | —        | Лития галлат              |          |          |          | —        | +        | —        |
| Бериллия окись      |          |          |          | —        | —        | —        | Лития иодат               |          |          |          | —        | —        | —        |
| Гадолиния молибдат  |          |          |          | —        | +        | —        | Лития ниобат              |          |          | +        | —        | —        | —        |
| Галлия антимонид    |          | +        |          |          |          |          | Лития танталат            |          |          | +        | —        | —        | —        |
| Галлия арсенид      |          | +        |          |          |          |          | Меди хлорид               |          | +        |          |          |          |          |
| Галлия фосфид       |          | +        |          |          |          |          | Натрия нитрит             |          |          |          | ±        | ±        |          |
| Индия арсенид       |          | +        |          |          |          |          | Свинца ниобат             |          |          |          | ±        | ±        | ±        |
| Кадмия селенид      |          |          |          | ±        |          | ±        | Свинца титанат            |          |          |          | ±        | ±        | ±        |
| Кадмия сульфид      |          |          |          | —        |          | +        | Тербия молибдат           |          |          |          | —        | +        | —        |
| Кадмия теллурид     |          |          |          |          |          |          | Цинка окись               |          |          |          | +        |          | —        |
| Калия дигидрофосфат |          | +        |          |          |          |          | Цинка селенид             |          | +        |          |          |          | +        |
| Кварц               | +        |          |          |          |          |          | Цинка сульфид             |          | +        |          | —        |          |          |
| Кремния карбид      |          |          |          | ±        |          | ±        | Цинка теллурид            |          | +        |          |          |          |          |

## ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В табл. 33.20 представлены данные по показателям преломления нелинейных кристаллов. Для двусных кристаллов принято, что главные показатели преломления соотносятся как

$$n_y > n_z > n_x.$$

Буквами  $a, b, c$  обозначены кристаллографические, а  $X, Y, Z$  — пьезоэлектрические оси кристаллов. В ряде случаев даны дисперсионные соотношения и изменения показателей преломления с температурой. В этих формулах  $\lambda, \nu$  и  $T$  представляются соответственно в мкм, см<sup>-1</sup> и К.

Таблица 33.20. Показатели преломления нелинейных кристаллов [2]

Алюминия фосфат  $AlPO_4$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  | $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| 0,4             | 1,5369 | 1,5465 | 1,4             | 1,5112 | 1,5198 |
| 0,5             | 1,5287 | 1,5385 | 1,6             | 1,5088 | 1,5174 |
| 0,6             | 1,5243 | 1,5334 | 1,8             | 1,5062 | 1,5145 |
| 0,7             | 1,5215 | 1,5301 | 2,0             | 1,5034 | 1,5116 |
| 0,8             | 1,5192 | 1,5281 | 2,2             | 1,5001 | 1,5083 |
| 1,0             | 1,5161 | 1,5245 | 2,4             | 1,4969 | 1,5048 |
| 1,2             | 1,5136 | 1,5223 | 2,6             | 1,4928 | 1,5006 |

Аммония дигидрофосфат  $ADP$   $NH_4H_2PO_4$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$   | $n_e$   |
|-----------------|---------|---------|
| 0,2138560       | 1,62598 | 1,56738 |
| 0,2288018       | 1,60785 | 1,55138 |
| 0,2536519       | 1,58688 | 1,53289 |
| 0,2967278       | 1,56462 | 1,51339 |
| 0,3021499       | 1,56270 | 1,51163 |
| 0,3125663       | 1,55917 | 1,50853 |
| 0,3131545       | 1,55897 | 1,50832 |

Продолжение табл. 33.20

| $\lambda$ , мкм | $n_o$   | $n_e$   |
|-----------------|---------|---------|
| 0,3341478       | 1,55300 | 1,50313 |
| 0,3650146       | 1,54615 | 1,49720 |
| 0,3654833       | 1,54608 | 1,49712 |
| 0,3662878       | 1,54592 | 1,49698 |
| 0,3906410       | 1,54174 |         |
| 0,4046561       | 1,53969 | 1,49159 |
| 0,4077811       | 1,53925 | 1,49123 |
| 0,4358350       | 1,53578 | 1,48831 |
| 0,4916036       |         | 1,48390 |
| 0,5460740       | 1,52662 | 1,48079 |
| 0,5769590       | 1,52478 | 1,47939 |
| 0,5790654       | 1,52466 | 1,47930 |
| 0,6328160       | 1,52166 | 1,47685 |
| 1,013975        | 1,50835 | 1,46895 |
| 1,128704        | 1,50446 | 1,46704 |
| 1,152276        | 1,50364 | 1,46666 |

$$n_o^2 = 2,302484 + 1,117089 \cdot 10^{-10} \nu^2 / (1 - \nu^2 / 7,605372 \times 10^9) + 3,751806 \cdot 10^6 / (2,5 \cdot 10^5 - \nu^2);$$

$$n_e^2 = 2,163077 + 9,670312 \cdot 10^{-11} \nu^2 / (1 - \nu^2 / 7,785289 \times 10^9) + 1,451540 \cdot 10^6 / (2,5 \cdot 10^5 - \nu^2);$$

$$\Delta n_o = (n_o^2 - 3,0297 n_o + 2,3004) \cdot 0,713 \cdot 10^{-2} (298 - T)$$

$$\Delta n_e = n_e^2 (0,675 \cdot 10^{-6}) \cdot (298 - T).$$

Аммония дидейтерофосфат  $ADDP$   $ND_4D_2PO_4$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  | $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| 0,350           | 1,5414 | 1,4923 | 0,690           | 1,5142 | 1,4737 |
| 0,530           | 1,5198 | 1,4784 | 1,060           | 1,5088 | 1,4712 |

Аммония биоксалата моногидрат  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha=Z}$ | $n_{\beta=Y}$ | $n_{\gamma=X}$ |
|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| 0,4471          | 1,4460         | 1,5599        | 1,6119         |
| 0,4713          | 1,4447         | 1,5561        | 1,6084         |
| 0,4922          | 1,4435         | 1,5544        | 1,6050         |
| 0,5016          | 1,4426         | 1,5536        | 1,6037         |
| 0,5461          | 1,4406         | 1,5493        | 1,5993         |
| 0,5780          | 1,4391         | 1,5470        | 1,5965         |
| 0,5876          | 1,4388         | 1,5469        | 1,5952         |
| 0,6678          | 1,4362         | 1,5426        | 1,5892         |
| 0,7016          | 1,4352         | 1,5408        | 1,5874         |
| 1,014           | 1,4295         | 1,5312        | 1,5763         |
| 1,129           | 1,4276         | 1,5284        | 1,5728         |
| 1,367           | 1,4235         | 1,5222        | 1,5652         |

Бария титанат  $\text{BaTiO}_3$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  | $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| 0,4579          | 2,5637 | 2,4825 | 0,5321          | 2,4760 | 2,4128 |
| 0,4765          | 2,5355 | 2,4605 | 0,6328          | 2,4164 | 2,3637 |
| 0,4880          | 2,5206 | 2,4487 | 1,0642          | 2,3379 | 2,2970 |
| 0,5145          | 2,4917 | 2,4255 | 2,1284          | 2,2947 | 2,2593 |

$$n_o^2 - 1 = 4,239 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2229)^2];$$

$$n_e^2 - 1 = 4,0854 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2087)^2].$$

Бария-натрия ниобат  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha=c=Z}$ | $n_{\beta=a=X}$ | $n_{\gamma=b=Y}$ |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0,4579          | 2,2931           | 2,4266          | 2,4284           |
| 0,4765          | 2,2799           | 2,4076          | 2,4094           |
| 0,4880          | 2,2727           | 2,3974          | 2,3991           |
| 0,4965          | 2,2678           | 2,3903          | 2,3920           |
| 0,5017          | 2,2649           | 2,3862          | 2,3879           |
| 0,5145          | 2,2583           | 2,3767          | 2,3786           |
| 0,5321          | 2,2502           | 2,3655          | 2,3672           |
| 0,6328          | 2,2177           | 2,3205          | 2,3222           |
| 1,0642          | 2,1700           | 2,2567          | 2,2580           |

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 3,6008 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,17944)^2];$$

$$n_{\beta}^2 - 1 = 3,9495 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,20035)^2];$$

$$n_{\gamma}^2 - 1 = 3,9495 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,20097)^2].$$

Бария-калия-натрия ниобат  $\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{Ba}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ 

$$n_o^2 = 3,6680 + 24,681 / [(4,3004)^2 - (1,2394/\lambda)^2];$$

$$n_e^2 = 2,9198 + 46,737 / [(5,1605)^2 - (1,2394/\lambda)^2] \text{ при } 22^\circ\text{C}.$$

Бензил  $(\text{C}_6\text{H}_5)_2(\text{CO})_2$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ | $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ |
|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| 0,4205          | 1,737 | 1,737 | 0,5461          | 1,667 | 1,684 |
| 0,4358          | 1,716 | 1,720 | 0,5780          | 1,660 | 1,680 |
| 0,4380          | 1,712 | 1,718 | 0,5893          | 1,658 | 1,679 |
| 0,4620          | 1,694 | 1,705 | 0,6560          | 1,648 | 1,672 |
| 0,4860          | 1,682 | 1,695 |                 |       |       |

$$n_o^2 - 1 = 1,08 + 0,535 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,24)^2] + 0,0150 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,398)^2];$$

$$n_e^2 - 1 = 1,35 + 0,370 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,24)^2] + 0,0138 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,395)^2].$$

Бериллия оксид  $\text{BeO}$ ,  $22,4^\circ\text{C}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$   | $n_e$   |
|-----------------|---------|---------|
| 0,430           | 1,73039 |         |
| 0,440           | 1,72924 | 1,74556 |
| 0,450           | 1,72820 | 1,74447 |
| 0,460           | 1,72725 | 1,74348 |
| 0,470           | 1,72626 | 1,74251 |
| 0,480           | 1,72542 | 1,74162 |
| 0,490           | 1,72460 | 1,74073 |
| 0,500           | 1,72388 | 1,74002 |
| 0,510           | 1,72308 | 1,73918 |
| 0,520           | 1,72249 | 1,73852 |
| 0,530           | 1,72177 | 1,73779 |
| 0,540           | 1,72121 | 1,73703 |
| 0,550           | 1,72062 | 1,73644 |
| 0,560           | 1,72006 | 1,73588 |
| 0,570           | 1,71950 | 1,73530 |
| 0,580           | 1,71903 | 1,73477 |
| 0,590           | 1,71856 | 1,73423 |
| 0,600           | 1,71795 | 1,73381 |
| 0,610           | 1,71762 | 1,73322 |
| 0,620           | 1,71710 | 1,73279 |
| 0,630           | 1,71668 | 1,73233 |
| 0,640           | 1,71632 | 1,73191 |
| 0,650           | 1,71589 | 1,73156 |
| 0,660           | 1,71554 | 1,73113 |
| 0,670           | 1,71517 | 1,73075 |
| 0,680           | 1,71482 | 1,73041 |
| 0,690           | 1,71450 |         |

$$n_o^2 - 1 = 1,919087 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,00727575) + 3,972323 \lambda^2 / (\lambda^2 - 199,31087);$$

$$n_e^2 - 1 = 1,972142 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,00748564) + 17,5787 \lambda^2 / (\lambda^2 - 779,49122).$$

Висмута германат  $\text{Bi}_4\text{GeO}_{12}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n$                | $\lambda$ , мкм | $n$                |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 0,4765          | 2,142              | 0,5321          | 2,115 <sub>2</sub> |
| 0,4880          | 2,135 <sub>7</sub> | 0,6328          | 2,086 <sub>1</sub> |
| 0,4965          | 2,131 <sub>8</sub> | 1,0642          | 2,044 <sub>3</sub> |
| 0,5017          | 2,128 <sub>8</sub> |                 |                    |
| 0,5145          | 2,123 <sub>7</sub> |                 |                    |

$$n^2 - 1 = 3,08959 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,01337).$$

Гадолиния молибдат  $Gd_2(MoO_4)_3$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_a = b - Y$ | $n_\beta = a = X$ | $n_\gamma = c = Z$ |
|-----------------|---------------|-------------------|--------------------|
| 0,4579          | 1,8758        | 1,8762            | 1,9342             |
| 0,4765          | 1,8694        | 1,8699            | 1,9270             |
| 0,4880          | 1,8659        | 1,8663            | 1,9229             |
| 0,4965          | 1,8634        | 1,8639            | 1,9201             |
| 0,5017          | 1,8621        | 1,8625            | 1,9185             |
| 0,5145          | 1,8588        | 1,8593            | 1,9148             |
| 0,5321          | 1,8545        | 1,8549            | 1,9102             |
| 0,6328          | 1,8385        | 1,8390            | 1,8915             |
| 1,064           | 1,8142        | 1,8146            | 1,8637             |

$$n_a^2 - 1 = 2,2450 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,022693); n_\beta^2 - 1 = 2,24654 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,0226803); n_\gamma^2 - 1 = 2,41957 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,0245458).$$

## Галлия арсенид GaAs

| $\lambda$ , мкм | $n$   | $\lambda$ , мкм | $n$   |
|-----------------|-------|-----------------|-------|
| 1,127           | 3,455 | 1,550           | 3,375 |
| 1,239           | 3,425 | 1,652           | 3,366 |
| 1,377           | 3,400 |                 |       |

## Галлия фосфид GaP

| $\lambda$ , мкм | $n$    | $\lambda$ , мкм | $n$    |
|-----------------|--------|-----------------|--------|
| 0,5             | 3,4595 | 1,8             | 3,0439 |
| 0,6             | 3,3495 | 2,0             | 3,0379 |
| 0,7             | 3,2442 | 2,2             | 3,0331 |
| 0,8             | 3,1830 | 2,4             | 3,0296 |
| 0,9             | 3,1430 | 2,6             | 3,0271 |
| 1,0             | 3,1192 | 2,8             | 3,0236 |
| 1,1             | 3,0981 | 3,0             | 3,0215 |
| 1,2             | 3,0844 | 3,2             | 3,0197 |
| 1,4             | 3,0646 | 3,4             | 3,0181 |
| 1,6             | 3,0509 | 3,6             | 3,0166 |
|                 |        | 3,8             | 3,0159 |
|                 |        | 4,0             | 3,0137 |

Германия-цинка фосфид  $ZnGeP$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,64            | 3,5052 | 3,5802 |
| 0,66            | 3,4756 | 3,5467 |
| 0,68            | 3,4477 | 3,5160 |
| 0,70            | 3,4233 | 3,4885 |
| 0,75            | 3,3730 | 3,4324 |
| 0,80            | 3,3357 | 3,3915 |
| 0,85            | 3,3063 | 3,3593 |
| 0,90            | 3,2830 | 3,3336 |
| 0,95            | 3,2638 | 3,3124 |
| 1,00            | 3,2478 | 3,2954 |
| 1,20            | 3,2054 | 3,2493 |

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 1,40            | 3,1820 | 3,2244 |
| 2,00            | 3,1490 | 3,1889 |
| 2,40            | 3,1388 | 3,1780 |
| 3,00            | 3,1304 | 3,1693 |
| 3,40            | 3,1263 | 3,1647 |
| 4,00            | 3,1223 | 3,1608 |
| 4,50            | 3,1186 | 3,1561 |
| 5,00            | 3,1149 | 3,1533 |
| 6,00            | 3,1101 | 3,1480 |
| 7,00            | 3,1040 | 3,1420 |
| 8,00            | 3,0961 | 3,1350 |
| 9,00            | 3,0880 | 3,1272 |
| 10,00           | 3,0788 | 3,1183 |
| 11,00           | 3,0689 | 3,1087 |
| 12,00           | 3,0552 | 3,0949 |

## Индия антимонид InSb

| $\lambda$ , мкм | $n$  | $\lambda$ , мкм | $n$  |
|-----------------|------|-----------------|------|
| 7,87            | 4,0  | 15,13           | 3,88 |
| 8,00            | 3,99 | 15,79           | 3,87 |
| 9,01            | 3,96 | 16,96           | 3,86 |
| 10,06           | 3,95 | 17,85           | 3,85 |
| 11,01           | 3,93 | 18,85           | 3,84 |
| 12,06           | 3,92 | 19,98           | 3,82 |
| 12,98           | 3,91 | 21,15           | 3,81 |
| 13,90           | 3,90 | 22,20           | 3,80 |

## Кадмия селенид CdSe

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,8             | 2,6448 | 2,6607 |
| 0,9             | 2,5826 | 2,6027 |
| 1,0             | 2,5502 | 2,5696 |
| 1,2             | 2,5132 | 2,5331 |
| 1,4             | 2,4929 | 2,5133 |
| 1,6             | 2,4818 | 2,5008 |
| 1,8             | 2,4732 | 2,4930 |
| 2,0             | 2,4682 | 2,4873 |
| 2,2             | 2,4642 | 2,4840 |
| 2,4             | 2,4612 | 2,4798 |
| 2,6             | 2,4590 | 2,4784 |
| 2,8             | 2,4562 | 2,4757 |
| 3,0             | 2,4542 | 2,4741 |
| 3,2             | 2,4532 | 2,4726 |
| 3,4             | 2,4518 | 2,4714 |
| 3,6             | 2,4509 | 2,4702 |
| 3,8             | 2,4498 | 2,4694 |
| 4,0             | 2,4491 | 2,4685 |

## Кадмия сульфид CdS

| $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ |
|-----------------|-------|-------|
| 0,5120          | —     | 2,751 |
| 0,5130          | —     | 2,743 |
| 0,5140          | —     | 2,737 |
| 0,5150          | 2,743 | 2,726 |
| 0,5160          | 2,735 | 2,720 |
| 0,5170          | 2,727 | 2,714 |
| 0,5180          | 2,718 | 2,706 |
| 0,5190          | 2,709 | 2,702 |
| 0,5200          | 2,702 | 2,698 |
| 0,5210          | 2,700 | 2,694 |
| 0,5220          | 2,694 | 2,689 |
| 0,5230          | 2,687 | 2,685 |
| 0,5240          | 2,681 | 2,680 |
| 0,5250          | 2,674 | 2,675 |
| 0,5275          | 2,661 | 2,665 |
| 0,5300          | 2,649 | 2,654 |
| 0,5325          | 2,638 | 2,644 |
| 0,5350          | 2,628 | 2,637 |
| 0,5375          | 2,617 | 2,628 |
| 0,5400          | 2,609 | 2,622 |
| 0,5425          | 2,602 | 2,612 |
| 0,5450          | 2,594 | 2,606 |
| 0,5475          | 2,587 | 2,600 |
| 0,5500          | 2,580 | 2,593 |
| 0,5750          | 2,528 | 2,545 |
| 0,6000          | 2,493 | 2,511 |
| 0,6250          | 2,467 | 2,484 |
| 0,6500          | 2,446 | 2,463 |
| 0,6750          | 2,427 | 2,446 |
| 0,7000          | 2,414 | 2,432 |
| 0,7500          | 2,390 | 2,409 |
| 0,8000          | 2,374 | 2,392 |
| 0,8500          | 2,364 | 2,378 |
| 0,9000          | 2,359 | 2,368 |
| 0,9500          | 2,341 | 2,359 |
| 1,0000          | 2,334 | 2,352 |
| 1,0500          | 2,328 | 2,346 |
| 1,1000          | 2,324 | 2,340 |
| 1,1500          | 2,320 | 2,336 |
| 1,2000          | 2,316 | 2,332 |
| 1,2500          | 2,312 | 2,329 |
| 1,3000          | 2,309 | 2,326 |
| 1,3500          | 2,306 | 2,323 |
| 1,4000          | 2,304 | 2,321 |

## Кадмия теллурид CdTe

| $\lambda$ , мкм | $n$  | $\lambda$ , мкм | $n$  |
|-----------------|------|-----------------|------|
| 0,903           | 2,91 | 7,0—10,0        | 2,69 |
| 1,0             | 2,84 | 10              | 2,69 |
| 1,1             | 2,81 | 14,0            | 2,69 |
| 1,0—1,3         | 2,82 |                 |      |

$$n^2 - 1 = 4,68 + 1,53 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,366)$$

Кадмия-ртути тиоцианат  $\text{Cd}[\text{Hg}(\text{SCN})_4]$ , 27°C

| $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ |
|-----------------|-------|-------|
| 0,530           | 2,003 | 1,792 |
| 0,633           | 1,970 | 1,753 |
| 1,06            | 1,924 | 1,728 |

Калия битартрат  $\text{K}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot (1/2) \text{H}_2\text{O}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_\alpha$ | $n_\beta$ | $n_\gamma$ |
|-----------------|------------|-----------|------------|
| 0,3650          | 1,5156     | 1,5487    | 1,5630     |
| 0,4047          | 1,5090     | 1,5409    | 1,5541     |
| 0,4358          | 1,5049     | 1,5368    | 1,5494     |
| 0,5461          | 1,4961     | 1,5271    | 1,5384     |
| 0,5780          | 1,4945     | 1,5253    | 1,5363     |
| 1,014           | 1,4846     | 1,5142    | 1,5238     |
| 1,129           | 1,4832     | 1,5127    | 1,5218     |
| 1,367           | 1,4809     | 1,5102    | 1,5183     |

Калия дигидроарсенат  $\text{KDA} \text{KH}_2 \text{AsO}_4$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  | $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| 0,4861          | 1,5762 | 1,5252 | 0,5893          | 1,5674 | 1,5179 |
| 0,5460          | 1,5707 | 1,5206 | 0,6563          | 1,5632 | 1,5146 |

Калия дигидрофосфат  $\text{KDP} \text{KH}_2\text{PO}_4$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$   | $n_e$   |
|-----------------|---------|---------|
| 0,2138560       | 1,60177 | 1,54615 |
| 0,2536519       | 1,56631 | 1,51586 |
| 0,2800869       | 1,55263 | 1,50416 |
| 0,2980628       | 1,54618 | 1,49824 |
| 0,3021499       | 1,54433 | 1,49708 |
| 0,3035781       |         | 1,49667 |
| 0,3125663       | 1,54117 | 1,49434 |
| 0,3131545       | 1,54098 | 1,49419 |
| 0,3341478       |         | 1,48954 |
| 0,3650146       | 1,52932 | 1,48432 |
| 0,3654833       | 1,52923 | 1,48423 |
| 0,3662878       | 1,52909 | 1,48409 |
| 0,3906410       |         | 1,48089 |
| 0,4046561       | 1,52341 | 1,47927 |
| 0,4077811       | 1,52301 | 1,47898 |
| 0,4358350       | 1,51900 | 1,47640 |
| 0,4916036       |         | 1,47254 |
| 0,5460740       | 1,51152 | 1,46982 |
| 0,5769580       | 1,50987 |         |
| 0,5790654       | 1,50977 | 1,46856 |
| 0,6328160       | 1,50737 | 1,46685 |
| 1,013975        | 1,49535 | 1,46041 |
| 1,128704        | 1,49205 | 1,45917 |
| 1,152276        | 1,49135 | 1,45893 |
| 1,357070        | 1,48455 |         |
| 1,523100        | —       | 1,45521 |
| 1,529525        | —       | 1,45512 |

$$n_o^2 = 2,259276 + 1,008956 \cdot 10^{-10} \nu^2 / (1 - \nu^2 / 7,726408 \times 10^9) + \frac{3,251305 \cdot 10^6}{(2,5 \cdot 10^5 - \nu^2)}; n_e^2 = 2,132668 + 8,637494 \times 10^{-11} \nu^2 / (1 - \nu^2 / 7,142631 \cdot 10^9) + 8,069981 \cdot 10^5 / (2,5 \cdot 10^5 - \nu^2); \Delta n_o = 0,402 \cdot 10^{-4} \cdot (n_o^2 - 1,432) (298 - T); \Delta n_e = 0,221 \cdot 10^{-4} \cdot (n_e^2 - 1,105) (298 - T).$$

Калия дидейторфосфат KDDR  $KD_2PO_4$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,4047          | 1,5189 | 1,4776 |
| 0,4078          | 1,5185 | 1,4772 |
| 0,4358          | 1,5155 | 1,4747 |
| 0,4916          | 1,5111 | 1,4710 |
| 0,5461          | 1,5079 | 1,4683 |
| 0,5779          | 1,5063 | 1,4670 |
| 0,6234          | 1,5044 | 1,4656 |
| 0,6907          | 1,5022 | 1,4639 |
| 1,000           | 1,4700 | 1,4400 |

$$\Delta n_o = 0,228 \cdot 10^{-4} (n_o^2 - 1,047) (298 - T);$$

$$\Delta n_e = 0,955 \cdot 10^{-5} n_e^2 (298 - T).$$

Калия дитионат  $K_2S_2O_6$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ |
|-----------------|-------|-------|
| 0,313           | 1,480 | 1,568 |
| 0,334           | 1,475 | 1,557 |
| 0,365           | 1,470 | 1,546 |
| 0,405           | 1,465 | 1,537 |
| 0,436           | 1,463 | 1,530 |
| 0,546           | 1,456 | 1,518 |
| 0,578           | 1,455 | 1,516 |
| 1,014           | 1,448 | 1,503 |
| 1,367           | 1,446 | 1,500 |
| 1,709           | 1,444 | 1,498 |
| 2,930           | 1,436 | 1,489 |
| 3,39            | 1,430 | 1,485 |

Калия-лития ниобат  $K_2Li_2Nb_5O_{15}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,4500          | 2,4049 | 2,2512 |
| 0,4750          | 2,3751 | 2,2315 |
| 0,5000          | 2,3546 | 2,2144 |
| 0,5250          | 2,3349 | 2,2010 |
| 0,5324          | 2,3260 | 2,1975 |
| 0,5500          | 2,3156 | 2,1900 |
| 0,5750          | 2,3016 | 2,1801 |
| 0,6000          | 2,2899 | 2,1720 |
| 0,6250          | 2,2799 | 2,1645 |
| 0,6500          | 2,2711 | 2,1586 |
| 0,6750          | 2,2631 | 2,1529 |

$$n_o^2 - 1 = 3,708 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,04601);$$

$$n_e^2 - 1 = 3,349 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,03564).$$

 $\alpha$ -Кварц  $\alpha$ - $SiO_2$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$   | $n_e$   |
|-----------------|---------|---------|
| 0,185           | 1,65751 | 1,68988 |
| 0,198           | 1,65087 | 1,66394 |
| 0,231           | 1,61395 | 1,62555 |

| $\lambda$ , мкм | $n_o$   | $n_e$   |
|-----------------|---------|---------|
| 0,340           | 1,56747 | 1,57737 |
| 0,394           | 1,55846 | 1,56805 |
| 0,434           | 1,55396 | 1,56339 |
| 0,508           | 1,54822 | 1,55746 |
| 0,5893          | 1,54424 | 1,55335 |
| 0,7680          | 1,53903 | 1,54794 |
| 0,8325          | 1,53773 | 1,54661 |
| 0,9914          | 1,53514 | 1,54392 |
| 1,1592          | 1,53283 | 1,54152 |
| 1,3070          | 1,53090 | 1,53951 |
| 1,3958          | 1,52977 | 1,53832 |
| 1,4792          | 1,52865 | 1,53716 |
| 1,5414          | 1,52781 | 1,53630 |
| 1,6815          | 1,52583 | 1,53422 |
| 1,7614          | 1,52468 | 1,53301 |
| 1,9457          | 1,52184 | 1,53004 |
| 2,0531          | 1,52005 | 1,52823 |
| 2,3000          | 1,51561 |         |
| 2,6000          | 1,50986 |         |
| 3,0000          | 1,49953 |         |
| 3,5000          | 1,48451 |         |
| 4,0000          | 1,46671 |         |
| 4,2000          | 1,4569  |         |
| 5,000           | 1,417   |         |
| 6,4500          | 1,274   |         |
| 7,000           | 1,167   |         |

Кислота гиппуровая  $C_6H_5CO \cdot NH(CH_2CO_2H)$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_\alpha$ | $n_\beta$ | $n_\gamma$ |
|-----------------|------------|-----------|------------|
| 0,350           | 1,55       | 1,61      | 1,78       |
| 0,589           | 1,5348     | 1,5921    | 1,7598     |
| 0,700           | 1,534      | 1,589     | 1,755      |

Кислота  $\alpha$ -иодноватая  $\alpha$ - $HIO_3$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_\alpha = a = X$ | $n_\beta = c = Z$ | $n_\gamma = b = Y$ |
|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 0,450           | 1,8798             | 2,0184            | 2,0560             |
| 0,500           | 1,8621             | 1,9930            | 2,0192             |
| 0,5325          | 1,8547             | 1,9829            | 2,0103             |
| 0,550           | 1,8497             | 1,9787            | 2,0049             |
| 0,600           | 1,8409             | 1,9665            | 1,9922             |
| 0,650           | 1,8352             | 1,9571            | 1,9812             |
| 0,700           | 1,8308             | 1,9505            | 1,9765             |
| 0,800           | 1,8250             | 1,9407            | 1,9672             |
| 0,850           | 1,8223             | 1,9378            | 1,9639             |
| 0,900           | 1,8206             | 1,9347            | 1,9595             |
| 0,950           | 1,8180             | 1,9318            | 1,9564             |
| 1,000           | 1,8147             | 1,9292            | 1,9537             |
| 1,065           | 1,8123             | 1,9275            | 1,9508             |
| 1,100           | 1,8116             | 1,9260            | 1,9484             |
| 1,200           | 1,8086             | 1,9230            | 1,9436             |

## Кремния карбид SiC

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  | $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| 0,4880          | 2,6916 | 2,7423 | 0,5321          | 2,6689 | 2,7167 |
| 0,5017          | 2,6837 | 2,7337 | 0,6328          | 2,6351 | 2,6794 |
| 0,5145          | 2,6771 | 2,7261 | 1,0642          | 2,5830 | 2,6225 |

$$n_o^2 - 1 = 5,5515 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1625)^2];$$

$$n_e^2 - 1 = 5,7382 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,16897)^2].$$

Лития галлат LiGaO<sub>3</sub>

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha, \beta=Y, Z}$ | $n_{\gamma=X}$ | $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha, \beta=Y, Z}$ | $n_{\gamma=X}$ |
|-----------------|--------------------------|----------------|-----------------|--------------------------|----------------|
| 0,4100          | 1,7702                   | 1,804          | 1,4000          | 1,7095                   | 1,7372         |
| 0,4500          | 1,757                    | 1,7895         | 1,6000          | 1,707                    | 1,735          |
| 0,5000          | 1,7466                   | 1,7785         | 1,8000          | 1,7045                   | 1,7325         |
| 0,5500          | 1,7395                   | 1,7702         | 2,0000          | 1,7025                   | 1,7303         |
| 0,6000          | 1,7343                   | 1,7615         | 2,2000          | 1,7005                   | 1,7268         |
| 0,7000          | 1,7268                   | 1,7565         | 2,4000          | 1,6978                   | 1,7242         |
| 0,8000          | 1,7218                   | 1,7507         | 2,6000          | 1,6955                   | 1,7225         |
| 0,9000          | 1,7185                   | 1,7475         | 2,8000          | 1,6925                   | 1,720          |
| 1,0000          | 1,716                    | 1,7445         |                 |                          |                |
| 1,2000          | 1,7122                   | 1,7405         |                 |                          |                |

Лития иодат LiIO<sub>3</sub>

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  | $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| 0,4579          | 1,9186 | 1,7633 | 0,5145          | 1,9018 | 1,7506 |
| 0,4765          | 1,9124 | 1,7586 | 0,5321          | 1,8978 | 1,7475 |
| 0,4880          | 1,9089 | 1,7560 | 0,6328          | 1,8815 | 1,7351 |
| 0,4965          | 1,9065 | 1,7541 | 1,0642          | 1,8517 | 1,7168 |
| 0,5017          | 1,9051 | 1,7531 |                 |        |        |

$$n_o^2 - 1 = 2,40109 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,021865);$$

$$n_e^2 - 1 = 1,91359 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,01940).$$

Лития формиата моногидрат LiCHO<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha=X=a}$ | $n_{\beta=Y=b}$ | $n_{\gamma=Z=c}$ |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0,4579          | 1,3708           | 1,4901          | 1,5308           |
| 0,4765          | 1,3698           | 1,4883          | 1,5286           |
| 0,4880          | 1,3692           | 1,4873          | 1,5272           |
| 0,4965          | 1,3688           | 1,4866          | 1,5264           |
| 0,5017          | 1,3686           | 1,4862          | 1,5258           |
| 0,5145          | 1,3680           | 1,4851          | 1,5245           |
| 0,5321          | 1,3675           | 1,4838          | 1,5229           |
| 0,6328          | 1,3645           | 1,4784          | 1,5163           |
| 1,0642          | 1,3593           | 1,4673          | 1,5035           |

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 0,8415 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,0953)^2]; \quad n_{\beta}^2 - 1 = 1,14106 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1183)^2]; \quad n_{\gamma}^2 - 1 = 1,2454 \times \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,12496)^2].$$

Лития ниобат LiNbO<sub>3</sub>

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,42            | 2,4144 | 2,3638 |
| 0,45            | 2,3814 | 2,2765 |
| 0,50            | 2,3444 | 2,2446 |
| 0,55            | 2,3188 | 2,2241 |
| 0,60            | 2,3002 | 2,2083 |
| 0,70            | 2,2862 | 2,1964 |
| 0,80            | 2,2756 | 2,1874 |
| 0,90            | 2,2598 | 2,1741 |
| 1,00            | 2,2487 | 2,1647 |
| 1,20            | 2,2407 | 2,1580 |
| 1,40            | 2,2291 | 2,1481 |
| 1,60            | 2,2208 | 2,1410 |
| 1,80            | 2,2139 | 2,1351 |
| 2,00            | 2,2074 | 2,1297 |
| 2,20            | 2,2015 | 2,1244 |
| 2,40            | 2,1948 | 2,1187 |
| 2,60            | 2,1882 | 2,1138 |
| 2,80            | 2,1814 | 2,1080 |
| 3,00            | 2,1741 | 2,1020 |
| 3,20            | 2,1663 | 2,0955 |
| 3,40            | 2,1580 | 2,0886 |
| 3,60            | 2,1493 | 2,0814 |
| 3,80            | 2,1398 | 2,0735 |
| 4,00            | 2,1299 | 2,0652 |
| 4,20            | 2,1193 | 2,0564 |

$$n_o^2 - 1 = 3,9130 + \frac{1,173 \cdot 10^5 + 1,65 \cdot 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2,12 \cdot 10^2 + 2,7 \cdot 10^{-5} T^2)^2} -$$

$$- 2,78 \cdot 10^{-8} \lambda^2; \quad n_e^2 - 1 = 3,5567 + 2,605 \cdot 10^{-7} T^2 +$$

$$+ \frac{0,970 \cdot 10^5 + 2,70 \cdot 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2,01 \cdot 10^2 + 5,4 \cdot 10^{-5} T^2)^2} - 2,24 \cdot 10^{-8} \lambda^2.$$

Лития сульфата моногидрат LiSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha}$ | $n_{\beta}$ | $n_{\gamma}$ |
|-----------------|--------------|-------------|--------------|
| 0,3650          | 1,4771       | 1,4926      | 1,5029       |
| 0,4047          | 1,4722       | 1,4876      | 1,4980       |
| 0,4358          | 1,4693       | 1,4849      | 1,4951       |
| 0,4471          | 1,4686       | 1,4834      | 1,4941       |
| 0,4713          | 1,4670       |             | 1,4926       |
| 0,5016          | 1,4652       | 1,4802      | 1,4905       |
| 0,5461          | 1,4631       | 1,4782      | 1,4882       |
| 0,5780          | 1,4619       | 1,4772      | 1,4867       |
| 0,5876          | 1,4616       | 1,4766      | 1,4866       |
| 0,6678          | 1,4593       | 1,4743      | 1,4838       |
| 0,7016          | 1,4585       |             | 1,4831       |
| 1,014           | 1,4538       | 1,4678      | 1,4777       |
| 1,129           | 1,4525       | 1,4666      | 1,4761       |
| 1,367           | 1,4502       | 1,4636      | 1,4732       |
| 1,530           | 1,4485       |             | 1,4708       |
| 1,709           | 1,4466       | 1,4588      | 1,4676       |



Лития тапталат  $\text{LiTaO}_3$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,45            | 2,2420 | 2,2468 |
| 0,50            | 2,2160 | 2,2205 |
| 0,60            | 2,1834 | 2,1878 |
| 0,70            | 2,1652 | 2,1696 |
| 0,80            | 2,1538 | 2,1578 |
| 0,90            | 2,1454 | 2,1493 |
| 1,00            | 2,1391 | 2,1432 |
| 1,20            | 2,1305 | 2,1341 |
| 1,40            | 2,1236 | 2,1273 |
| 1,60            | 2,1174 | 2,1213 |
| 1,80            | 2,1120 | 2,1170 |
| 2,00            | 2,1066 | 2,1115 |
| 2,20            | 2,1009 | 2,1053 |
| 2,40            | 2,0951 | 2,0993 |
| 2,60            | 2,0891 | 2,0936 |
| 2,80            | 2,0825 | 2,0871 |
| 3,00            | 2,0755 | 2,0799 |
| 3,20            | 2,0680 | 2,0727 |
| 3,40            | 2,0601 | 2,0649 |
| 3,60            | 2,0513 | 2,0561 |
| 3,80            | 2,0424 | 2,0473 |
| 4,00            | 2,0335 | 2,0377 |

Меди бромид  $\text{CuBr}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n$               | $\lambda$ , мкм | $n$               |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 0,4358          | $2,336 \pm 0,002$ | 0,5791          | $2,122 \pm 0,002$ |
| 0,4678          | $2,229 \pm 0,002$ | 0,5896          | $2,117 \pm 0,002$ |
| 0,4800          | $2,207 \pm 0,002$ | 0,6438          | $2,096 \pm 0,002$ |
| 0,5086          | $2,171 \pm 0,002$ | 0,7699          | $2,069 \pm 0,004$ |
| 0,5461          | $2,141 \pm 0,002$ |                 |                   |

Меди иодид  $\text{CuI}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n$               | $\lambda$ , мкм | $n$               |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 0,4358          | $2,562 \pm 0,002$ | 0,5791          | $2,347 \pm 0,002$ |
| 0,4678          | $2,461 \pm 0,002$ | 0,5896          | $2,342 \pm 0,002$ |
| 0,4800          | $2,448 \pm 0,002$ | 0,6438          | $2,315 \pm 0,002$ |
| 0,5086          | $2,411 \pm 0,002$ | 0,7699          | $2,280 \pm 0,004$ |
| 0,5461          | $2,372 \pm 0,002$ |                 |                   |

Меди хлорид  $\text{CuCl}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n$               | $\lambda$ , мкм | $n$               |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 0,4047          | $2,153 \pm 0,001$ | 0,5086          | $2,004 \pm 0,001$ |
| 0,4078          | $2,141 \pm 0,001$ | 0,5461          | $1,987 \pm 0,001$ |
| 0,4358          | $2,072 \pm 0,001$ | 0,5791          | $1,976 \pm 0,001$ |
| 0,4678          | $2,033 \pm 0,001$ | 0,5896          | $1,972 \pm 0,001$ |
| 0,4800          | $2,023 \pm 0,001$ | 0,6438          | $1,958 \pm 0,001$ |
|                 |                   | 0,7699          | $1,941 \pm 0,002$ |

Натрия бромат  $\text{NaBrO}_3$ 

$$n^2 - 1 = 1,3194 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,09)^2] + 0,2357 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2)^2] - 0,0174 \lambda^2.$$

Натрия нитрит  $\text{NaNO}_2$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_{a=a-X}$ | $n_{\beta=b-Y}$ | $n_{\gamma=c-Z}$ |
|-----------------|-------------|-----------------|------------------|
| 0,4358          | 1,3531      | 1,4212          | 1,690            |
| 0,4800          | 1,350       | 1,4166          | 1,675            |
| 0,5086          | 1,3484      | 1,4158          | 1,6685           |
| 0,5461          | 1,3470      | 1,4137          | 1,6620           |
| 0,5791          | 1,3458      | 1,4122          | 1,6567           |
| 0,5889          | 1,3455      | 1,4120          | 1,6555           |
| 0,6438          | 1,3442      | 1,4105          | 1,6510           |

Натрия хлорат  $\text{NaClO}_3$ 

| $\lambda$ , мкм | $n$   | $\lambda$ , мкм | $n$   |
|-----------------|-------|-----------------|-------|
| 0,2310          | 1,616 | 0,4862          | 1,522 |
| 0,2573          | 1,585 | 0,5173          | 1,519 |
| 0,2748          | 1,572 | 0,5892          | 1,515 |
| 0,3256          | 1,549 | 0,6563          | 1,513 |
| 0,3404          | 1,544 | 0,6867          | 1,512 |
| 0,3467          | 1,542 | 0,7188          | 1,511 |
| 0,3611          | 1,539 |                 |       |

$$n^2 - 1 = 1,1825 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,09)^2] + 0,07992 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,185)^2] - 0,00864 \lambda^2.$$

Пираргирит  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ 

$$n_o^2 - 1 = 6,585 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,4)^2] + 0,1133 \lambda^2 / [\lambda^2 - (15)^2]; \quad n_e^2 - 1 = 5,845 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,4)^2] + 0,0202 \lambda^2 / [\lambda^2 - (15)^2].$$

Прусит  $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ , 20° C

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,5876          |        | 2,7896 |
| 0,6328          | 3,0190 | 2,7391 |
| 0,6678          | 2,9804 | 2,7094 |
| 1,0140          | 2,8264 | 2,5901 |
| 1,1290          | 2,8067 | 2,5756 |
| 1,3670          | 2,7833 | 2,5570 |
| 1,530           | 2,7728 | 2,5485 |
| 1,709           | 2,7654 | 2,5423 |
| 2,50            | 2,7478 | 2,5282 |
| 3,56            | 2,7379 | 2,5213 |
| 4,62            | 2,7318 | 2,5178 |

$$n_o^2 = 7,483 + 0,474 / (\lambda^2 - 0,09) - 0,0019 \lambda^2;$$

$$n_e^2 = 6,346 + 0,342 / (\lambda^2 - 0,09) - 0,0011 \lambda^2.$$

Ртутит сульфит  $\alpha$ -HgS

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,62            | 2,9028 | 3,2560 |
| 0,65            | 2,8655 | 3,2064 |
| 0,68            | 2,8384 | 3,1703 |
| 0,70            | 2,8224 | 3,1489 |
| 0,80            | 2,7704 | 3,0743 |
| 0,90            | 2,7383 | 3,0340 |
| 1,00            | 2,7120 | 3,0050 |
| 1,20            | 2,6884 | 2,9680 |
| 1,40            | 2,6730 | 2,9475 |
| 1,60            | 2,6633 | 2,9344 |
| 1,80            | 2,6567 | 2,9258 |
| 2,00            | 2,6518 | 2,9194 |
| 2,20            | 2,6483 | 2,9146 |
| 2,40            | 2,6455 | 2,9108 |
| 2,60            | 2,6433 | 2,9079 |
| 2,80            | 2,6414 | 2,9052 |
| 3,00            | 2,6401 | 2,9036 |
| 3,20            | 2,6387 | 2,9017 |
| 3,40            | 2,6375 | 2,9001 |
| 3,60            | 2,6358 | 2,8987 |
| 3,80            | 2,6353 | 2,8971 |
| 4,00            | 2,6348 | 2,8963 |
| 5,00            | 2,6267 | 2,8863 |
| 6,00            | 2,6233 | 2,8799 |
| 7,00            | 2,6156 | 2,8741 |
| 8,00            | 2,6112 | 2,8674 |
| 9,00            | 2,6066 | 2,8608 |
| 10,00           | 2,6018 | 2,8522 |
| 11,00           | 2,5914 | 2,8434 |

Рубидия дигидрофосфат RDP  $\text{RbH}_2\text{PO}_4$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,4765          | 1,514  | 1,4861 |
| 0,4880          | 1,5132 | 1,4832 |
| 0,4965          | 1,5126 | 1,4827 |
| 0,5017          | 1,5121 | 1,4825 |
| 0,5145          | 1,5116 | 1,4820 |
| 0,5321          | 1,5106 | 1,4811 |
| 0,6328          | 1,4976 | 1,4775 |
| 1,0642          | 1,4926 | 1,4700 |

$$n_o^2 - 1 = 1,2068 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,01539);$$

$$n_e^2 - 1 = 1,15123 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,010048).$$

Свинца ниобат  $\text{PbNb}_4\text{O}_{11}$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha=a=X}$ | $n_{\beta=b=Y}$ | $n_{\gamma=c=Z}$ |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0,4579          | 2,4754           | 2,4766          | 2,5047           |
| 0,4765          | 2,4554           | 2,4571          | 2,4845           |
| 0,4880          | 2,4445           | 2,4465          | 2,4735           |
| 0,4965          | 2,4371           | 2,4392          | 2,466            |
| 0,5017          | 2,4329           | 2,435           | 2,4618           |

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha=a=X}$ | $n_{\beta=b=Y}$ | $n_{\gamma=c=Z}$ |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 0,5145          | 2,4231           | 2,4254          | 2,4518           |
| 0,5321          | 2,4113           | 2,4137          | 2,4396           |
| 0,6328          | 2,3644           | 2,3667          | 2,3922           |
| 1,0642          | 2,2979           | 2,301           | 2,3254           |

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 4,124 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,202)^2]; n_{\beta}^2 - 1 = 4,139 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,201)^2]; n_{\gamma}^2 - 1 = 4,246 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2014)^2].$$

Свинца титанат  $\text{PbTiO}_3$ 

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,4880          | 2,793  | 2,7744 |
| 0,5017          | 2,7742 | 2,7574 |
| 0,5145          | 2,7586 | 2,7431 |
| 0,5321          | 2,7398 | 2,7260 |
| 0,6328          | 2,6676 | 2,6594 |
| 1,0642          | 2,5712 | 2,5692 |
| 1,152           | 2,5637 | 2,5623 |

$$n_o^2 - 1 = 5,359 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,224)^2];$$

$$n_e^2 - 1 = 5,365 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,2170)^2].$$

## Селен Se

| $\lambda$ , мкм | $n_o$             | $n_e$             |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1,06            | $2,790 \pm 0,008$ | $3,608 \pm 0,008$ |
| 1,15            | $2,737 \pm 0,008$ | $3,573 \pm 0,008$ |
| 3,39            | $2,650 \pm 0,01$  | $3,460 \pm 0,01$  |
| 10,60           | $2,64 \pm 0,01$   | $3,41 \pm 0,01$   |

Серебра титогаллат  $\text{AgGaS}_2$ , 20° C

| $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ |
|-----------------|-------|-------|
| 0,4916          | 2,700 | 2,710 |
| 0,5016          | 2,683 | 2,676 |
| 0,5461          | 2,619 | 2,585 |
| 0,5780          | 2,587 | 2,546 |
| 0,5876          | 2,579 | 2,537 |
| 0,6678          | 2,529 | 2,481 |

$$n_o^2 = 5,728 + 0,2410 / (\lambda^2 - 0,0870) - 0,00210 \lambda^2;$$

$$n_e^2 = 5,497 + 0,2026 / (\lambda^2 - 0,1307) - 0,00233 \lambda^2.$$

## Теллур Те

| $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ |
|-----------------|-------|-------|
| 4,0             | 6,372 | 4,929 |
| 5,0             | 6,316 | 4,864 |
| 6,0             | 6,286 | 4,838 |
| 7,0             | 6,270 | 4,821 |
| 8,0             | 6,257 | 4,809 |
| 9,0             | 6,253 | 4,802 |
| 10,0            | 6,246 | 4,796 |
| 12,0            | 6,237 | 4,789 |
| 14,0            | 6,230 | 4,785 |

Тербия молибдат Tb (MoO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha=b \rightarrow Y}$ | $n_{\beta=a \rightarrow X}$ | $n_{\gamma=c \rightarrow Z}$ |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 0,4579          | 1,8864                       | 1,8867                      | 1,9433                       |
| 0,4765          | 1,8797                       | 1,8800                      | 1,9358                       |
| 0,4880          | 1,8760                       | 1,8764                      | 1,9316                       |
| 0,4965          | 1,8734                       | 1,8739                      | 1,9288                       |
| 0,5017          | 1,8720                       | 1,8724                      | 1,9271                       |
| 0,5145          | 1,8687                       | 1,8690                      | 1,9232                       |
| 0,5321          | 1,8645                       | 1,8649                      | 1,9185                       |
| 0,6328          | 1,8476                       | 1,8482                      | 1,8993                       |
| 1,0642          | 1,8222                       | 1,8226                      | 1,8704                       |

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 2,27241 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,023359);$$

$$n_{\beta}^2 - 1 = 2,273955 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,02333);$$

$$n_{\gamma}^2 - 1 = 2,443016 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,025133).$$

## d-Треонин

| $\lambda$ , мкм | $n_{\alpha=X}$ | $n_{\beta=Y}$ | $n_{\gamma=Z}$ |
|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| 0,4579          | 1,5299         | 1,6039        | 1,6125         |
| 0,4765          | 1,5282         | 1,6017        | 1,6100         |
| 0,4880          | 1,5272         | 1,6004        | 1,6087         |
| 0,4965          | 1,5266         | 1,5996        | 1,6077         |
| 0,5017          | 1,5263         | 1,5991        | 1,6072         |
| 0,5145          | 1,5254         | 1,5979        | 1,6059         |
| 0,5321          | 1,5243         | 1,5965        | 1,6043         |
| 0,6328          | 1,5196         | 1,5898        | 1,5974         |
| 1,0642          | 1,5114         | 1,5788        | 1,5855         |

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 1,273 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1032)^2];$$

$$n_{\beta}^2 - 1 = 1,477 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1137)^2];$$

$$n_{\gamma}^2 - 1 = 1,497 \lambda^2 / [\lambda^2 - (0,1169)^2].$$

## Турмалин

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,4765          | 1,6474 | 1,6273 |
| 0,4880          | 1,6465 | 1,6263 |
| 0,4965          | 1,6457 | 1,6255 |
| 0,5017          | 1,6454 | 1,6251 |
| 0,5145          | 1,6446 | 1,6248 |
| 0,5320          | 1,6433 | 1,6231 |
| 0,6328          | 1,6378 | 1,6183 |
| 1,0642          | 1,6274 | 1,6088 |

$$n_o^2 - 1 = 1,6346 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,010734);$$

$$n_e^2 - 1 = 1,57256 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,011346).$$

Уротропин (CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>N<sub>4</sub>

| $\lambda$ , мкм | $n$    | $\lambda$ , мкм | $n$    |
|-----------------|--------|-----------------|--------|
| 0,4861          | 1,5984 | 0,5780          | 1,5899 |
| 0,5016          | 1,5953 | 0,5876          | 1,5893 |
| 0,5461          | 1,5917 | 0,6676          | 1,5856 |

## Цинка окись ZnO

| $\lambda$ , мкм | $n_o$  | $n_e$  |
|-----------------|--------|--------|
| 0,45            | 2,1058 | 2,1231 |
| 0,50            | 2,0511 | 2,0681 |
| 0,60            | 1,9985 | 2,0147 |
| 0,70            | 1,9735 | 1,9897 |
| 0,80            | 1,9597 | 1,9752 |
| 0,90            | 1,9493 | 1,9654 |
| 1,00            | 1,9435 | 1,9589 |
| 1,20            | 1,9354 | 1,9500 |
| 1,40            | 1,9298 | 1,9429 |
| 1,60            | 1,9257 | 1,9402 |
| 1,80            | 1,9226 | 1,9370 |
| 2,00            | 1,9197 | 1,9330 |
| 2,20            | 1,9173 | 1,9313 |
| 2,40            | 1,9152 | 1,9297 |
| 2,60            | 1,9128 | 1,9265 |
| 2,80            | 1,9100 | 1,9251 |
| 3,00            | 1,9075 | 1,9214 |
| 3,20            | 1,9049 | 1,9186 |
| 3,40            | 1,9022 | 1,9160 |
| 3,60            | 1,8994 | 1,9127 |
| 3,80            | 1,8964 | 1,9101 |
| 4,00            | 1,8891 | 1,9068 |

## Цинка селенид ZnSe

| $\lambda$ , мкм | $n$  | $\lambda$ , мкм | $n$  |
|-----------------|------|-----------------|------|
| 0,589           | 2,61 | 1,5             | 2,45 |
| 1,0             | 2,48 | 2,0             | 2,44 |

$$n^2 - 1 = 2,855 + 2,045 \lambda^2 / (\lambda^2 - 0,109).$$

## Цинка сульфид ZnS

| $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ | $\lambda$ , мкм | $n_o$ | $n_e$ |
|-----------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| 0,3600          | 2,705 | 2,709 | 0,5000          | 2,421 | 2,425 |
| 0,3750          | 2,637 | 2,640 | 0,5250          | 2,402 | 2,407 |
| 0,4000          | 2,560 | 2,564 | 0,5500          | 2,386 | 2,392 |
| 0,4100          | 2,539 | 2,544 | 0,5750          | 2,375 | 2,378 |
| 0,4200          | 2,522 | 2,525 | 0,6000          | 2,363 | 2,368 |
| 0,4250          | 2,511 | 2,514 | 0,6250          | 2,354 | 2,358 |
| 0,4300          | 2,502 | 2,505 | 0,6500          | 2,346 | 2,350 |
| 0,4400          | 2,486 | 2,488 | 0,6750          | 2,339 | 2,343 |
| 0,4500          | 2,473 | 2,477 | 0,7000          | 2,332 | 2,337 |
| 0,4600          | 2,459 | 2,463 | 0,8000          | 2,324 | 2,328 |
| 0,4700          | 2,448 | 2,453 | 0,9000          | 2,310 | 2,315 |
| 0,4750          | 2,445 | 2,449 | 1,000           | 2,301 | 2,303 |
| 0,4800          | 2,438 | 2,443 | 1,200           | 2,290 | 2,294 |
| 0,4900          | 2,428 | 2,433 | 1,400           | 2,285 | 2,288 |

## Цинка теллурид ZnTe, 25° С

| $\lambda$ , мкм | $n$   | $\lambda$ , мкм | $n$   |
|-----------------|-------|-----------------|-------|
| 0,569           | 3,111 | 0,760           | 2,871 |
| 0,577           | 3,085 | 0,770           | 2,866 |
| 0,579           | 3,079 | 0,800           | 2,853 |
| 0,589           | 3,054 | 1,000           | 2,790 |
| 0,600           | 3,035 | 1,200           | 2,758 |
| 0,616           | 3,005 | 1,300           | 2,748 |
| 0,650           | 2,962 | 1,400           | 2,741 |
| 0,700           | 2,913 | 1,500           | 2,734 |
| 0,725           | 2,893 | 1,515           | 2,734 |
| 0,750           | 2,879 | 2,060           | 2,71  |

## 33.8. ВЫНУЖДЕННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА

В сильном световом поле в нелинейной среде может происходить взаимодействие оптических волн не только друг с другом, но и с акустическими и молекулярными колебаниями вещества. Интенсивная световая волна частоты  $\omega$ , возбуждая в среде когерентные акустические или молекулярные колебания с частотой  $\Omega$ , одновременно дает рассеянную световую волну с частотой

$$\omega' = \omega \pm \Omega.$$

Если возбуждаемые колебания акустические, то рассеяние называют *вынужденным рассеянием Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ)* и

$$\Omega_{M-B} = 2\omega(v_{\text{зв}}/c) \sin(\theta/2),$$

где  $v_{\text{зв}}$  и  $c$  — соответственно скорости звука и света в среде;  $\theta$  — угол, отсчитываемый от направления распространения световой волны (угол наблюдения). Наибольший сдвиг частоты происходит при рассеянии назад ( $\theta = \pi$ ), при этом  $\Omega_{M-B} \approx 10^{10}$  Гц ( $1 \text{ см}^{-1}$ ).

Если возбуждаются молекулярные колебания, то в зависимости от строения молекул вещества  $\Omega \sim 100 \div 1000 \text{ см}^{-1}$  и рассеяние называют *вынужденным комбинационным рассеянием (ВКР)*.

В общем случае в ВКР может наблюдаться целый набор частот <sup>\*1</sup>

$$\omega' = \omega \pm m\Omega' \pm n\Omega'' \pm \dots,$$

где  $\Omega'$ ,  $\Omega''$  — характерные молекулярные колебания данного вещества, а  $m$  и  $n$  — целые числа.

Характерный сдвиг частоты  $\Omega$  при ВКР

| Газы                                   | $\Omega$ , $\text{см}^{-1}$ |
|----------------------------------------|-----------------------------|
| Кислород . . . . .                     | 1552                        |
| Калия пары . . . . .                   | 2721                        |
| Метан . . . . .                        | 2916                        |
| Дейтерий . . . . .                     | 2991                        |
| Водород . . . . .                      | 4155                        |
| Жидкости                               |                             |
| Бромформ . . . . .                     | 222                         |
| Тетрахлорэтилен . . . . .              | 447                         |
| Четыреххлористый углерод . . . . .     | 460                         |
| Этил иодистый . . . . .                | 497                         |
| Гексафторбензол . . . . .              | 515                         |
| Бромформ . . . . .                     | 539                         |
| Трихлорэтилен . . . . .                | 640                         |
| Сероуглерод . . . . .                  | 656                         |
| Хлороформ . . . . .                    | 667                         |
| орто-Ксилол . . . . .                  | 730                         |
| $\alpha$ -Диметилфенетиламин . . . . . | 836                         |
| Диоксан . . . . .                      | 836                         |
| Морфолин . . . . .                     | 841                         |
| Тиофенол . . . . .                     | 916                         |
| Нитрометан . . . . .                   | 927                         |
| Бензол дейтерированный . . . . .       | 944                         |
| Кумол . . . . .                        | 990                         |
| 1, 3-Дибромбензол . . . . .            | 990                         |
| Бензол . . . . .                       | 992                         |
| Пиридин . . . . .                      | 992                         |
| Анилин . . . . .                       | 997                         |
| Стирол . . . . .                       | 998                         |
| мета-Толуидин . . . . .                | 999                         |
| Бромбензол . . . . .                   | 1000                        |
| Хлорбензол . . . . .                   | 1001                        |
| Бензонитрил . . . . .                  | 1002                        |
| трет-Бутилбензол . . . . .             | 1002                        |
| Этилбензол . . . . .                   | 1002                        |
| Толуол . . . . .                       | 1004                        |
| Фторбензол . . . . .                   | 1012                        |
| $\gamma$ -Пиколин . . . . .            | 1016                        |
| мета-Крезол . . . . .                  | 1029                        |
| 1-Фтор-2-хлорбензол . . . . .          | 1030                        |
| мета-Дихлорбензол . . . . .            | 1030                        |
| Иодбензол . . . . .                    | 1070                        |
| Бензоил хлористый . . . . .            | 1086                        |
| Бензальдегид . . . . .                 | 1086                        |

<sup>\*1</sup> Для рассеяния Мандельштама — Бриллюэна аналогично  $\omega' = \omega \pm k\Omega_{M-B}$ , где  $k$  — целое.

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| Анизол                              | 1097 |
| Пиррол                              | 1178 |
| Фуран                               | 1180 |
| Стирол                              | 1315 |
| Нитробензол                         | 1344 |
| 1-Бромнафталин                      | 1368 |
| 1-Хлорнафталин                      | 1368 |
| 2-Этилнафталин                      | 1381 |
| мета-Нитротолуол                    | 1389 |
| Хинолин                             | 1427 |
| Бромциклогексан                     | 1438 |
| Фуран                               | 1522 |
| Метиловый эфир салициловой кислоты  | 1612 |
| Коричный альдегид                   | 1624 |
| Стирол                              | 1629 |
| 3-Метилбутadiен                     | 1638 |
| Пентадиен                           | 1655 |
| Изопрен                             | 1792 |
| Гексин-1                            | 2116 |
| орто-Дихлорбензол                   | 2202 |
| Бензонитрил                         | 2229 |
| Ацетонитрил                         | 2250 |
| 1, 2-Диметиланилин                  | 2292 |
| Метилциклогексан                    | 2817 |
| Метиловый спирт                     | 2831 |
| цис-, транс-1, 3-Диметилциклогексан | 2844 |
| Тетрагидрофуран                     | 2849 |
| Циклогексан                         | 2852 |
| цис-1, 2-Диметилциклогексан         | 2854 |
| α-Диметилфенетиламин                | 2856 |
| Диоксан                             | 2856 |
| Циклогексан                         | 2863 |
| Циклогексанон                       | 2863 |
| цис-, транс-1, 3-Диметилциклогексан | 2870 |
| цис-1, 4-Диметилциклогексан         | 2873 |
| Циклогексан                         | 2884 |
| Хлористый метилен                   | 2902 |
| Морфолин                            | 2902 |
| 2-Октан                             | 2908 |
| 2, 3-Диметил-1, 5-гексадиен         | 2910 |
| Лимонен                             | 2910 |
| орто-Ксилол                         | 2913 |
| Гексин-1                            | 2915 |
| цис-2-Гептан                        | 2920 |
| Мезитилен                           | 2920 |
| 2-Бромпропан                        | 2920 |
| Апетон                              | 2921 |
| Этиловый спирт                      | 2921 |
| Карвон                              | 2922 |
| цис-1, 2-Диметилциклогексан         | 2927 |
| Диметилформамид                     | 2930 |
| 2-Хлор-2-Метилбутан                 | 2931 |
| 2-Октан                             | 2931 |
| цис, транс-1, 3-Диметилгексан       | 2931 |
| мета-Ксилол                         | 2933 |
| 1, 2-Диэтиловый эфир винной кислоты | 2933 |
| орто-Ксилол                         | 2933 |
| Пиперидин                           | 2933 |
| 1, 2-Диэтилбензол                   | 2934 |
| 2-Хлор-2-Метилбутен                 | 2935 |
| 1-Бромпропан                        | 2935 |
| Пиперидин                           | 2936 |
| Тетрагидрофуран                     | 2939 |
| Пиперидин                           | 2940 |
| Циклогексанон                       | 2945 |
| 2-Нитропропан                       | 2948 |
| 1, 2-Диэтилкарбонат                 | 2955 |

|                      |      |
|----------------------|------|
| 1, 2-Дихлорэтан      | 2956 |
| транс-Дихлорэтилен   | 2956 |
| 1-Бромпропан         | 2962 |
| 2-Хлор-2-Метилбутан  | 2962 |
| α-Диметилфенетиламин | 2967 |
| Диоксан              | 2967 |
| Циклогексанол        | 2982 |
| Циклопентан          | 2982 |
| Циклопентанол        | 2982 |
| Бромциклопентан      | 2982 |
| орто-Дихлорбензол    | 2982 |
| n-Хлортолуол         | 2982 |
| α-Пиколин            | 2982 |
| n-Ксилол             | 2988 |
| орто-Ксилол          | 2992 |
| Дибутилфталат        | 2992 |
| 1, 1, 1-Трихлорэтан  | 3018 |
| Хлоргидрин этилена   | 3022 |
| Изопорон             | 3022 |
| Нитрозодиметиламин   | 3022 |
| Пропилеогликоль      | 3022 |
| Циклогексан          | 3038 |
| Стирол               | 3056 |
| Бензол               | 3064 |
| трет-Бутилбензол     | 3064 |
| 1-Фтор-2-Хлорбензол  | 3084 |
| Живица               | 3090 |

|                  |      |
|------------------|------|
| Псевдокумол      | 3093 |
| Уксусная кислота | 3162 |
| Ацетонилацетон   | 3162 |
| Метилметакрылат  | 3162 |
| γ-Пиколин        | 3182 |
| Анилин           | 3300 |
| Вода             | 3651 |

## Твердые вещества

|                    |      |
|--------------------|------|
| Кварц              | 128  |
| Ниобат лития       | 152  |
| α-Сера             | 216  |
| Ниобат лития       | 248  |
| Кварц              | 466  |
| α-Сера             | 470  |
| Ниобит лития       | 628  |
| Вольфрамат кальция | 911  |
| Стильбен           | 997  |
| Полистирол         | 1001 |
| Кальцит            | 1084 |
| Алмаз              | 1332 |
| Нафталин           | 1380 |
| Стильбен           | 1591 |
| Триглицинсульфат   | 2422 |
| Триглицинсульфат   | 2702 |
| Триглицинсульфат   | 3022 |
| Полистирол         | 3054 |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советское радио, 1978.
2. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кокина. М.: Атомиздат, 1976.
3. Барьяхтар В. Г., Иванов Б. А., Четкин М. В.// Успехи физ. наук. 1985. Т. 146, вып. 3. С. 425.

### 34.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

*Лазеры*, или *оптические квантовые генераторы (ОКГ)* — это устройства для генерации когерентного оптического излучения, основанные на использовании эффекта вынужденного излучения (термин «лазер» происходит от английского light amplification by stimulated emission of radiation, что означает усиление света с помощью вынужденного излучения).

При наличии инверсной населенности уровней энергии  $E_2$  и  $E_1$  активной среды ( $E_2 > E_1$ ), т. е. при выполнении условия  $N_2/g_2 > N_1/g_1$  ( $N_2, N_1, g_2, g_1$  — населенности и кратности вырождения уровней  $E_2, E_1$ ) вынужденное излучение превалирует над поглощением и свет с резонансной частотой  $\omega = E_2 - E_1 / \hbar$  усиливается при прохождении через среду. Усиленный таким образом свет люминесценции активной среды называют излучением сверхлюминесценции. Для возникновения генерации вводят положительную обратную связь, располагая активную среду в оптическом резонаторе, который в простейшем случае представляет собой два параллельных зеркала. Одно из зеркал резонатора делается полупрозрачным для частичного вывода излучения. Пространственное распределение поля генерируемого излучения соответствует собственным колебаниям резонатора, называемым модами. Различают продольные и поперечные моды, относящиеся к распределению поля вдоль оси резонатора и в плоскости, перпендикулярной оси. Искусственное снижение добротности резонатора позволяет достичь значительного коэффициента усиления активной среды без возникновения генерации. Последующее быстрое включение добротности приводит к генерации мощных световых импульсов малой длительности (гигантских импульсов).

Основными свойствами лазерного излучения, отличающими его от излучения других источников света, являются:

- 1) высокая когерентность (объем когерентности может превышать в  $10^{17}$  раз объем когерентности световой волны той же интенсивности, получаемой от самых моноэнергетических нелазерных источников света);
- 2) возможность генерации импульсов предельно малой длительности (до  $\tau \sim 1,6 \cdot 10^{-14}$  с);
- 3) высокая мощность излучения (до  $10^{14}$  Вт) в импульсном режиме генерации.

Лазеры различаются:

- 1) по типу активной среды — *газовые* (атомные, ионные, молекулярные), *твердотельные* (на примесных кристаллах и стеклах, полупроводниковые, на центрах окраски), *жидкостные*;
- 2) по режиму генерации — *непрерывные*, *импульсные* (в режиме свободной генерации, с модуляцией добротности).

Сведения о принципах и режимах работы лазеров можно найти, к примеру, в [1, 2, 3].

### 34.2. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В настоящее время инверсная населенность и генерация в газообразной среде получены более чем на 6000 переходов. Газовые лазеры работают в очень широком диапазоне длин волн — от вакуумного ультрафиолета до инфракрасной области спектра — как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

Малая плотность и высокая однородность газооб-

разной активной среды обуславливают высокую направленность и моноэнергетичность лазерного излучения. Вместе с тем малая плотность газов не позволяет получить высокую плотность возбужденных частиц и такого удельного энергосъема, как в лазерах на основе конденсированных сред.

**Методы создания инверсной населенности [4].** Специфика газов проявляется и в многообразии физических процессов, применяемых для создания инверсной населенности. К их числу относятся возбуждение при соударениях в электрическом разряде, химическое возбуждение, фотодиссоциация, газодинамические процессы, оптическая накачка, электронно-лучевое возбуждение.

В подавляющем большинстве газовых лазеров инверсия населенностей создается в электрическом разряде. При этом электроны разряда возбуждают газ, создавая инверсию населенностей уровней энергии ионов, нейтральных атомов, устойчивых и неустойчивых молекул. Газоразрядный метод применим для возбуждения лазеров как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Электрический разряд в газе бывает самостоятельным и несамостоятельным. Несамостоятельные разряды могут быть получены в газах высокого давления и больших объемах. Переход к несамостоятельным разрядам позволил резко поднять мощность и энергию излучения прежде всего таких лазеров с большим КПД, как  $\text{CO}_2$ -лазеры.

Хорошо разработан метод создания несамостоятельного разряда с использованием пучка электронов высокой энергии. Электронные пучки применяются также, наряду с импульсными лампами, для инициации химических реакций. При химическом возбуждении инверсия населенностей создается в результате химических реакций, при которых образуются возбужденные атомы, радикалы, молекулы. К химическим можно отнести и лазеры, инверсия населенностей в которых достигается с помощью фотодиссоциации. Как правило, это быстротекущие реакции, инициируемые импульсной световой вспышкой.

Газодинамический метод получения инверсии основан на возможности получения потоков газов с быстро изменяющимися термодинамическими параметрами. Тепловая энергия нагретого газа при быстром охлаждении, например при протекании со сверхзвуковой скоростью через сопло, непосредственно преобразуется в таких системах в энергию электромагнитного моноэнергетического излучения.

При электронно-лучевом возбуждении газовых сред происходит ионизация газа электронами высокой энергии (0,3—3 МэВ). При этом энергия быстрых электронов первичного пучка каскадным образом преобразуется в энергию большого числа медленных электронов. Возбуждение верхних лазерных уровней осуществляется именно этими электронами низкой энергии.

Оптическая накачка для газовых активных сред эффективна, если источник накачки достаточно моноэнергетичен, поскольку резонансные линии поглощения газов узки. Обычно используются лазерные источники накачки.

Для газов характерна передача энергии возбуждения от частиц одного сорта частицам другого сорта при неупругих столкновениях между ними. Такая передача тем более эффективна, чем более точно совпадают уровни энергии сталкивающихся частиц.

В табл. 34.1 представлены вещества, на которых

получено стимулированное излучение. В табл. 34.2 приведены длины волн генерации. Порядок расположения веществ соответствует табл. 34.1. Сильные линии помечены жирным шрифтом. Длины волн в вакууме и воздухе обозначены  $\lambda_{\text{вак}}$  и  $\lambda_{\text{возд}}$ .

Для обозначения линий ионизованных атомов используются римские цифры, которые ставятся перед длиной волны перехода. Таким образом, II, III, IV обозначают одно-, двух-, трехкратно ионизованный атом.

В табл. 34.2 используется стандартная система обозначений молекулярной спектроскопии. Колебательно-вращательная полоса — совокупность переходов из верхнего колебательного состояния ( $v_1, v_2, \dots, v_n$ ) верх на нижнее ( $v_1, v_2, \dots, v_n$ ) нижн, где  $v_1, v_2, \dots, v_n$  — квантовые числа для  $n$  нормальных колебаний молекулы. Квантовые числа  $v_1, v_2, v_3$  для трехатомной молекулы относятся соответственно к симметричному валентному, деформационному и асимметричному валентному колебаниям. Чисто вращательные переходы — переходы между уровнями одного и того же электронного и колебательного состояния, различающиеся вращательным квантовым числом.

Более подробно информацию о газовых лазерах можно найти в [1, 2, 5, 6].

Таблица 34.1. Активные среды газовых лазеров (последовательность расположения в гл. 34 справочника)

Нейтральные и ионизованные атомы

|    |    |    |    |
|----|----|----|----|
| He | Ag | In | O  |
| Ne | Au | Tl | S  |
| Ar | Be |    | Se |
| Kr | Mg | C  | Te |
| Xe | Ca | Si | F  |
| Fe | Sr | Ge | Cl |
| Ni | Ba | Sn | Br |
| H  | Zn | N  | I  |
| Na | Cd | P  | Mn |
| K  | Hg | As | Sm |
| Rb | B  | Sb | Eu |
| Cs | Al | Bi | Tm |
| Cu | Ga | U  | Yb |

Двухатомные молекулы

|                 |                 |                 |     |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----|
| Xe <sub>2</sub> | XeF             | Bi <sub>2</sub> | HCl |
| Ar <sub>2</sub> | XeO             | S <sub>2</sub>  | DCI |
| Kr <sub>2</sub> | KrO             | Tc <sub>2</sub> | HBr |
| ArF             | HgBr            | F <sub>2</sub>  | DBr |
| ArCl            | HgCl            | Br <sub>2</sub> | NO  |
| KrBr            | H <sub>2</sub>  | Cl <sub>2</sub> | CN  |
| KrCl            | D <sub>2</sub>  | I <sub>2</sub>  | OH  |
| KrF             | HD              | ClF             | DD  |
| XeBr            | Na <sub>2</sub> | HF              | CO  |
| XeCl            | N <sub>2</sub>  | DF              |     |

Многоатомные молекулы

|                    |                 |                  |                  |
|--------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Xe <sub>2</sub> Cl | OCS             | ICN              | H <sub>2</sub> S |
| Xe <sub>2</sub> Br | CH <sub>2</sub> | NH <sub>2</sub>  | D <sub>2</sub> S |
| Kr <sub>2</sub> F  | CS <sub>2</sub> | NF <sub>2</sub>  | BF <sub>2</sub>  |
| O <sub>3</sub>     | HCN             | FNO              | BCl <sub>3</sub> |
| CO <sub>2</sub>    | DCN             | CINO             | SF <sub>6</sub>  |
| NO <sub>2</sub>    | HNC             | BrNO             | NH <sub>3</sub>  |
| C <sub>2</sub> O   | FCN             | H <sub>2</sub> O | PH <sub>3</sub>  |
| N <sub>2</sub> O   | CICN            | D <sub>2</sub> O | NOCl             |
| S <sub>2</sub> O   | BrCN            | SO <sub>2</sub>  |                  |

|                                  |                                 |                                                 |                                  |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------|
| CF <sub>4</sub>                  | CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | CH <sub>3</sub> CiH                             | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl |
| CF <sub>3</sub> Br               | CH <sub>3</sub> F               | CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>                 | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Br |
| CF <sub>3</sub> I                | CH <sub>3</sub> Cl              | CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub>                 | C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> CN |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>    | CH <sub>3</sub> Br              | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [OH] <sub>2</sub> | CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub> |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>    | CH <sub>3</sub> I               | CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F               | C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O  |
| H <sub>2</sub> CO                | CH <sub>3</sub> OH              | CH <sub>3</sub> CHF                             | ClO <sub>2</sub>                 |
| [H <sub>2</sub> CO] <sub>3</sub> | CH <sub>3</sub> CN              | CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>                 | HCCF                             |
| HCOOH                            | CH <sub>3</sub> Ne              | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl                | FCN                              |
| CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>   |                                 | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH                |                                  |

Таблица 34.2. Лазерные переходы в нейтральных и ионизованных атомах, в двухатомных и многоатомных молекулах

Активная среда He. Условия возбуждения: импульсный и непрерывный разряд в He при  $P = 30 \div 100$  Па; импульсный разряд в смеси He (1,5—2 кПа) и H<sub>2</sub> (400 Па)

$\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|          |         |        |
|----------|---------|--------|
| 0,706517 | 2,05813 | 8,53   |
| 0,706521 | 2,0603  | 95,763 |
| 1,8685   | 4,60535 | 216,12 |
| 1,9543   | 4,60567 |        |

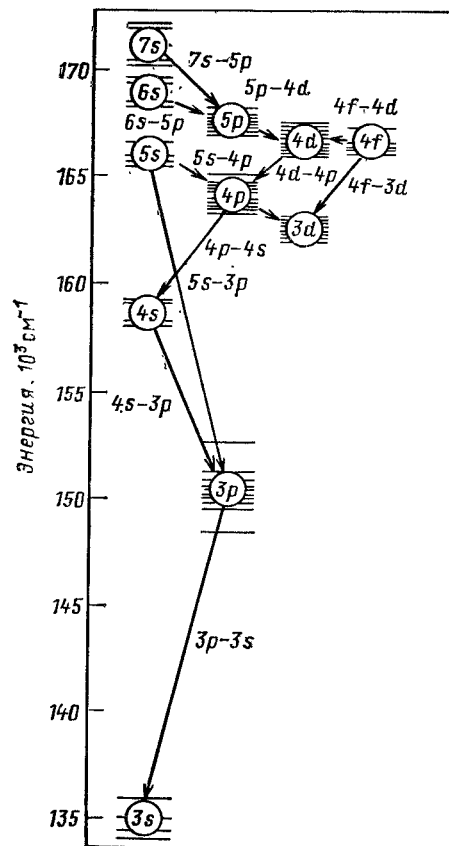


Рис. 34.1. Схема основных групп лазерных переходов в He [7]

Активная среда Ne [4] (рис. 34.1). Условия возбуждения: ионные переходы возбуждаются в импульсном разряде при плотности тока около  $1 \text{ кА/см}^2$  и  $P = 0,1 \div 1 \text{ Па}$ ; большинство атомных переходов возбуждается в смеси Ne (1–10 Па) и He (70 Па); многие переходы возбуждаются в чистом Ne

$\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$

|     |                   |               |        |
|-----|-------------------|---------------|--------|
| IV  | 0,2018424         | 1,2460        | 3,5835 |
| IV  | 0,2022186         | 1,2689        | 3,6515 |
| IV  | <b>0,2065304</b>  | 1,2887        | 3,7736 |
| III | <b>0,2177705</b>  | 1,2912        | 3,9806 |
| III | 0,2180858         | 1,4276        | 4,2171 |
| V   | 0,22657           | 1,4304        | 5,1696 |
| IV  | 0,2285793         | 1,4321        | 5,3243 |
| IV  | <b>0,2357980</b>  | 1,4330        | 5,3249 |
| IV  | 0,2373200         | 1,4346        | 5,4033 |
| III | <b>0,2473398</b>  | 1,4368        | 5,405  |
| III | 0,2609982         | 1,484450      | 5,6652 |
| III | 0,26134           | 1,486926      | 5,7053 |
| III | <b>0,2677918</b>  | 1,487247      | 5,7758 |
| III | <b>0,2678690</b>  | 1,488759      | 5,8844 |
| III | 0,2777634         | 1,489954      | 5,9563 |
| III | 0,2866726         | 1,493623      | 6,7769 |
| II  | 0,3319745         | 1,5231        | 6,8865 |
| II  | <b>0,3323745</b>  | 1,7162        | 6,9857 |
| II  | 0,332717          | 1,8210        | 7,3208 |
| II  | 0,332923          | 1,8253        | 7,4201 |
| III | 0,333114          | 1,8276        | 7,4217 |
| II  | 0,3345446         | 1,8304        | 7,4679 |
| II  | <b>0,3378256</b>  | 1,8403        | 7,4779 |
| II  | <b>0,3392799</b>  | 1,8591        | 7,4973 |
| II  | <b>0,339320</b>   | 1,8597        | 7,5292 |
| II  | <b>0,348195</b>   | 1,9574        | 7,5674 |
| II  | <b>0,371309</b>   | 1,9577        | 7,5850 |
|     | 0,54006           | 2,0350        | 7,6142 |
|     | 0,58525           | 2,0353        | 7,6440 |
|     | 0,59448           | 2,1041        | 7,6489 |
|     | 0,59393           | 2,1708        | 7,6904 |
|     | 0,60461           | 2,3260        | 7,6994 |
|     | 0,61180           | 2,37          | 7,7389 |
|     | 0,61431           | <b>2,3951</b> | 7,7634 |
|     | <b>0,63282</b>    | 2,4219        | 7,7794 |
|     | 0,63518           | 2,4250        | 7,8347 |
|     | 0,64011           | 2,5393        | 7,8693 |
|     | 0,73048           | 2,5524        | 7,9406 |
|     | 0,84634           | 2,7574        | 7,9824 |
|     | 0,86353           | 2,7819        | 8,0066 |
|     | 0,87717           | 2,9448        | 8,0599 |
|     | 0,88653           | 2,9668        | 8,1712 |
|     | 0,89886           | 2,9805        | 8,3347 |
|     | 0,92874           | 3,0260        | 8,3472 |
|     | 1,0295            | 3,0268        | 8,8388 |
|     | 1,0621            | 3,3173        | 8,8528 |
|     | 1,0798            | 3,391         | 9,0871 |
|     | 1,0844            | 3,3333        | 10,060 |
|     | 1,1141            | 3,3353        | 10,978 |
|     | 1,1177            | 3,3500        | 11,857 |
|     | 1,1390            | 3,3510        | 11,898 |
|     | 1,1409            | 3,3804        | 12,831 |
|     | 1,15235           | 3,3840        | 13,736 |
|     | <b>1,15259014</b> | 3,3903        | 13,756 |
|     | 1,1601            | <b>3,3913</b> | 16,634 |
|     | 1,1614            | 3,4471        | 16,664 |
|     | 1,17673           | 3,4489        | 16,889 |
|     | 1,1789            | 3,475         | 16,943 |
|     | 1,1985            | 4,4789        | 17,153 |
|     | 1,2066            |               |        |

|        |        |       |
|--------|--------|-------|
| 17,184 | 32,507 | 55,51 |
| 17,800 | 33,815 | 57,34 |
| 17,837 | 33,828 | 68,31 |
| 17,884 | 34,543 | 72,08 |
| 18,392 | 34,670 | 85,01 |
| 20,474 | 35,592 | 86,93 |
| 21,746 | 37,221 | 88,47 |
| 22,830 | 41,730 | 89,82 |
| 25,416 | 50,69  | 106,0 |
| 28,045 | 52,40  | 124,6 |
| 31,544 | 53,47  | 126,1 |
| 31,919 | 54,00  | 132,8 |
| 32,007 | 54,10  |       |

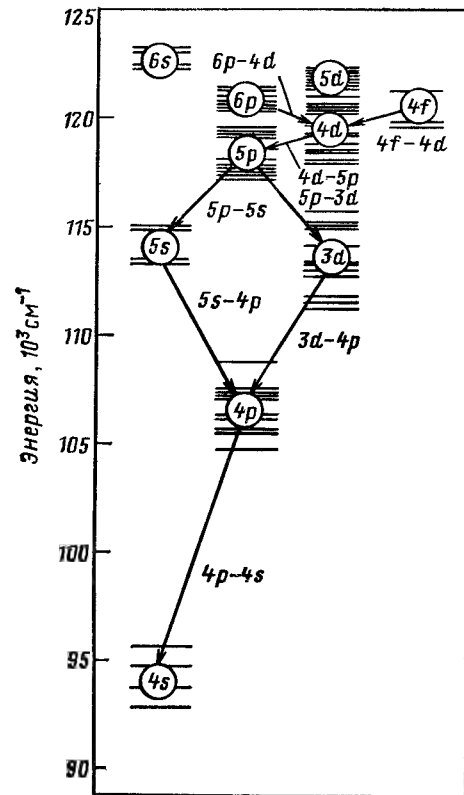


Рис. 34.2. Схема основных групп лазерных переходов в Ar [7]



**Активная среда Ag** (рис. 34.2). Условия возбуждения: почти все переходы возбуждаются в непрерывном режиме; плотность тока для ионизованного Ag 30—150 А/см<sup>2</sup> при давлении 1—80 Па; для возбуждения переходов в ультрафиолетовой области спектра ( $\lambda < 0,33$  мкм) необходима более высокая плотность тока; сильные линии  $\lambda = 0,351$  и  $0,364$  мкм могут быть возбуждены в непрерывном режиме; переходы в инфракрасной области спектра ( $\lambda > 1,6$  мкм) возбуждаются в слабом непрерывном разряде при давлении около 7 Па

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|     |           |     |          |         |
|-----|-----------|-----|----------|---------|
| IV  | 0,183730  | II  | 0,514532 | 2,862   |
| V   | 0,183733  | II  | 0,528690 | 2,8776  |
| IV  | 0,2113982 | III | 0,550220 | 2,8836  |
| IV  | 0,2248840 | II  | 0,64831  | 2,9273  |
| IV  | 0,2513298 | II  | 0,6730   | 2,9788  |
| IV  | 0,2621377 | II  | 0,68613  | 3,0454  |
| IV  | 0,2624882 |     | 0,7503   | 3,0988  |
| III | 0,2753884 | II  | 0,877186 | 3,1325  |
| III | 0,2884216 |     | 0,912297 | 3,1338  |
| III | 0,2855374 |     | 0,965778 | 3,6312  |
| IV  | 0,2912924 |     | 1,0470   | 3,70138 |
| IV  | 0,2926227 | II  | 1,092344 | 3,708   |
| III | 0,3002642 |     | 1,1448   | 3,71439 |
| III | 0,302405  |     | 1,21396  | 4,2033  |
| III | 0,305484  |     | 1,24028  | 4,7138  |
| III | 0,333613  |     | 1,27022  | 4,9148  |
| III | 0,334472  |     | 1,40948  | 4,9199  |
| III | 0,335849  |     | 1,5046   | 4,9496  |
| III | 0,351112  |     | 1,6180   | 5,02338 |
| III | 0,351418  |     | 1,619395 | 5,1203  |
| II  | 0,357661  |     | 1,652    | 5,1205  |
| III | 0,363789  |     | 1,6941   | 5,3897  |
| III | 0,37052   |     | 1,791437 | 5,4666  |
| III | 0,379532  |     | 2,0616   | 5,4680  |
| III | 0,385829  |     | 2,0986   | 5,8022  |
| III | 0,414671  |     | 2,1332   | 5,8461  |
| III | 0,418298  |     | 2,1534   | 6,0515  |
| II  | 0,437075  |     | 2,2038   | 6,7443  |
| II  | 0,448181  |     | 2,2077   | 6,9410  |
| II  | 0,454505  |     | 2,31339  | 6,9429  |
| II  | 0,457935  |     | 2,3966   | 7,2147  |
| II  | 0,460956  |     | 2,5008   | 7,7982  |
| II  | 0,465789  |     | 2,5487   | 7,8002  |
| II  | 0,472686  |     | 2,5504   | 7,8042  |
| II  | 0,476486  |     | 2,5627   | 12,138  |
| II  | 0,487986  |     | 2,5661   | 12,188  |
| II  | 0,488903  |     | 2,6542   | 15,032  |
| II  | 0,496507  |     | 2,6836   | 15,037  |
| III | 0,49928   |     | 2,71529  | 26,937  |
| II  | 0,501716  |     | 2,7357   | 26,956  |
| II  | 0,506204  |     | 2,8195   |         |
| II  | 0,514179  |     | 2,8238   |         |

**Активная среда Kr.** Условия возбуждения: почти все линии в кryptonе можно возбудить в непрерывном режиме; для ионизованного кryptonа необходима плотность тока 50—200 А/см<sup>2</sup> или 7—10 кА/см<sup>2</sup> (вакуумный ультрафиолет); давление 1—30 Па

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|     |           |     |           |         |
|-----|-----------|-----|-----------|---------|
| IV  | 0,175641  | II  | 0,512573  | 1,9211  |
| V   | 0,183243  | II  | 0,529831  | 2,04240 |
| IV  | 0,195027  | II  | 0,539865  | 2,1165  |
| IV  | 0,196808  | II  | 0,568188  | 2,19020 |
| IV  | 0,2051082 | II  | 0,575298  | 2,2475  |
| IV  | 0,2191916 | III | 0,603717  | 2,4260  |
| IV  | 0,2254638 | II  | 0,60381   | 2,52342 |
| IV  | 0,2338478 | II  | 0,616880  | 2,6260  |
| IV  | 0,2417843 | III | 0,631022  | 2,6281  |
| IV  | 0,2649357 | II  | 0,631276  | 2,86134 |
| IV  | 0,2664398 | II  | 0,641661  | 2,8656  |
| IV  | 0,2741380 | II  | 0,647088  | 2,9836  |
| III | 0,3049704 | II  | 0,65100   | 2,9870  |
| III | 0,3124363 | II  | 0,657012  | 3,0664  |
| III | 0,3239512 | II  | 0,66029   | 3,0528  |
| III | 0,337496  | II  | 0,676442  | 3,1508  |
| III | 0,3507420 | II  | 0,687084  | 3,3401  |
| III | 0,356423  | II  | 0,7435764 | 3,3411  |
| III | 0,406737  |     | 0,752546  | 3,4873  |
| III | 0,413133  |     | 0,7603    | 3,4885  |
| III | 0,415444  | II  | 0,79314   | 3,774   |
| III | 0,417179  | II  | 0,799322  | 3,956   |
| III | 0,422658  |     | 0,810433  | 3,9573  |
| II  | 0,431781  | II  | 0,828037  | 4,068   |
| II  | 0,438654  | II  | 0,85878   | 4,142   |
| III | 0,444329  | II  | 0,86901   | 4,3736  |
| II  | 0,457720  |     | 0,88058   | 4,3755  |
| II  | 0,458285  |     | 0,8929    | 4,8760  |
| II  | 0,461528  |     | 1,14582   | 4,8819  |
| II  | 0,461915  |     | 1,31775   | 4,9983  |
| II  | 0,463386  |     | 1,36225   | 4,9999  |
| II  | 0,465016  |     | 1,44269   | 5,1298  |
| II  | 0,468041  |     | 1,47648   | 5,2985  |
| II  | 0,469444  |     | 1,4966    | 5,3004  |
| II  | 0,476243  |     | 1,5330    | 5,5685  |
| II  | 0,476573  |     | 1,68533   | 5,5848  |
| II  | 0,482517  |     | 1,68965   | 5,6290  |
| II  | 0,484659  |     | 1,6936    | 7,0565  |
| III | 0,501645  |     | 1,7843    | 7,3605  |
| II  | 0,502240  |     | 1,8185    |         |

**Активная среда Xe.** Условия возбуждения: многие линии ионизованного Xe можно возбудить в непрерывном режиме; плотность тока 70—200 А/см<sup>2</sup>; при импульсном возбуждении многие линии в видимой области спектра генерируются одновременно; типичное давление  $(1-10) \cdot 10^{-4}$  Па; в атомарном Xe все линии длиннее 2,03 мкм можно возбудить в непрерывном режиме

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|     |           |     |           |     |          |
|-----|-----------|-----|-----------|-----|----------|
| IV  | 0,2232442 | IV  | 0,3330869 | IV  | 0,380322 |
| IV  | 0,2315357 | IV  | 0,334974  | IV  | 0,397302 |
| III | 0,247718  | III | 0,3454248 | III | 0,405005 |
| IV  | 0,2526664 | IV  | 0,348322  | III | 0,406048 |
| III | 0,2691939 | III | 0,359661  | III | 0,421401 |
| IV  | 0,29837   | IV  | 0,3645478 | III | 0,424024 |
| III | 0,3079738 | III | 0,366921  | III | 0,427259 |
| IV  | 0,3246922 | III | 0,374571  | III | 0,428588 |
| IV  | 0,3305957 | IV  | 0,375979  | IV  | 0,430577 |
| III | 0,330599  | III | 0,3780990 | III | 0,441314 |

|              |              |        |
|--------------|--------------|--------|
| III 0,443415 | II 0,597111  | 2,6665 |
| IV 0,455862  | II 0,609361  | 2,8590 |
| II 0,460303  | III 0,61766  | 3,1069 |
| IV 0,464759  | III 0,623824 | 3,2739 |
| IV 0,465073  | II 0,627081  | 3,3085 |
| III 0,467368 | IV 0,62865   | 3,3666 |
| III 0,468354 | II 0,63435   | 3,4014 |
| III 0,472357 | III 0,63435  | 3,4335 |
| III 0,474895 | II 0,652865  | 3,5070 |
| II 0,486249  | II 0,66943   | 3,6210 |
| III 0,486946 | IV 0,669950  | 3,6509 |
| II 0,488730  | II 0,70723   | 3,6788 |
| IV 0,495414  | III 0,714894 | 3,6849 |
| IV 0,496508  | II 0,76186   | 3,8666 |
| IV 0,500772  | II 0,782763  | 3,8940 |
| II 0,504492  | II 0,798800  | 3,9955 |
| IV 0,515703  | II 0,823162  | 4,0196 |
| IV 0,515905  | II 0,833270  | 4,1516 |
| III 0,523893 | II 0,840919  | 4,5381 |
| IV 0,525637  | III 0,85716  | 4,5665 |
| II 0,525992  | II 0,858251  | 4,5694 |
| IV 0,526015  | II 0,871617  | 4,6097 |
| II 0,526042  | II 0,904539  | 5,0230 |
| II 0,526195  | II 0,905930  | 5,0244 |
| II 0,531387  | II 0,926539  | 5,3551 |
| IV 0,534131  | II 0,928854  | 5,4735 |
| IV 0,534331  | II 0,969859  | 5,5739 |
| IV 0,535297  | II 0,979970  | 5,6019 |
| IV 0,539461  | II 1,063385  | 6,3103 |
| II 0,539525  | II 1,0950    | 6,3137 |
| III 0,540104 | II 1,36562   | 7,3147 |
| II 0,541915  | II 1,60519   | 7,4294 |
| IV 0,549933  | II 1,73254   | 9,0040 |
| III 0,552442 | II 2,02623   | 9,7002 |
| IV 0,55923   | II 2,3193    | 11,289 |
| II 0,565938  | II 2,4825    | 11,296 |
| II 0,57291   | II 2,51528   | 12,263 |
| II 0,575103  | II 2,6269    | 12,913 |
| II 0,589330  | II 2,65146   | 18,500 |
| IV 0,595565  | II 2,6601    | 75,578 |

Активная среда Fe. Условия возбуждения: импульсный разряд при диссоциации  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ; импульсное возбуждение паров Fe с Ne, а также фотодиссоциация  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  излучением Krf-лазера

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|
| 0,360                                | 0,4529 | 0,563  |
| 0,385                                | 0,540  | 6,8470 |
| 0,395                                | 0,558  | 8,4902 |

Активная среда Ni. Условия возбуждения: импульсный разряд при диссоциации  $\text{Ni}(\text{CO})_4$

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |        |  |
|--------------------------------------|--------|--|
| II 0,79624                           | 1,3968 |  |
| II 0,79754                           | 1,4550 |  |

Активная среда H. Условия возбуждения: импульсный разряд в  $\text{H}_2$  при  $P = 1,3$  Па и He при 470 Па

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |  |
|--------------------------------------|--|
| 0,4340                               |  |
| 0,4861                               |  |
| 1,8751                               |  |

Активная среда Na. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров Na при  $P = 0,13 \div 0,4$  Па и He при  $P = 0,13 \div 1,3$  кПа: фотодиссоциация галогенидов натрия

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |        |  |
|--------------------------------------|--------|--|
| 0,5866                               | 1,1382 |  |
| 0,5890                               | 1,1404 |  |

Активная среда K. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров K при  $P = 13$  Па и  $\text{H}_2$  при  $P = 400 \div 700$  Па: фотодиссоциация паров  $\text{K}_2$  излучением рубинового лазера

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |        |       |
|--------------------------------------|--------|-------|
| 0,4045                               | 1,2523 | 6,4   |
| 0,7665                               | 2,72   | 7,9   |
| 0,7699                               | 3,140  | 12,5  |
| 1,17                                 | 3,15   | 15,95 |
| 1,2434                               | 3,16   |       |

Активная среда Rb. Условия возбуждения: фотодиссоциация паров  $\text{Rb}_2$  излучением рубинового лазера; оптическая накачка лазерами на красителях

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|
| 0,4210                               | 1,37  | 2,293 |
| 0,7619                               | 1,48  | 2,79  |
| 0,7758                               | 1,53  | 49,68 |
| 0,7800                               | 2,254 | 50,93 |
| 0,7945                               |       |       |

Активная среда Cs. Условия накачки: оптическая накачка паров  $\text{Cs}_2$  излучением линии He с  $\lambda = 0,3880$  мкм. Фотодиссоциация паров  $\text{Cs}_2$  излучением ультрафиолетовых лазеров

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |       |        |
|--------------------------------------|-------|--------|
| 0,4555                               | 1,01  | 2,95   |
| 0,8521                               | 1,360 | 3,010  |
| 0,8764                               | 1,376 | 3,095  |
| 0,8943                               | 1,47  | 3,2040 |
|                                      |       | 7,1871 |

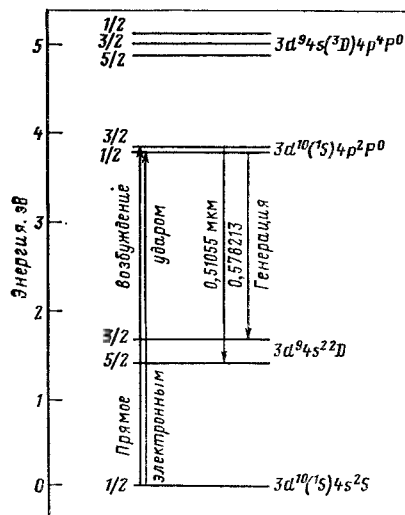


Рис. 34.3. Схема лазерных переходов с длинами волн 0,5105 и 0,5782 мкм в парах Cu [7]

Активная среда Си (рис. 34.3). Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Си и He

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| II 0,27032                          | 0,5700      | II 0,808858 |
| II 0,24858                          | 0,578213    | II 0,8096   |
| II 0,25063                          | II 0,72558  | II 0,819228 |
| II 0,25905                          | II 0,73999  | II 0,8277   |
| II 0,25988                          | II 0,740434 | II 0,828321 |
| II 0,450600                         | II 0,74382  | II 0,851104 |
| II 0,455592                         | II 0,766470 | II 1,7438   |
| II 0,467356                         | II 0,773868 | II 1,7708   |
| II 0,468199                         | II 0,777874 | II 1,8004   |
| II 0,485497                         | II 0,780519 | 1,8196      |
| II 0,490973                         | II 0,780766 | 1,8228      |
| II 0,493165                         | II 0,782566 | II 1,8448   |
| II 0,501261                         | II 0,784503 | II 1,9154   |
| II 0,502129                         | II 0,789583 | II 1,9328   |
| II 0,505178                         | II 0,794442 | II 1,9479   |
| II 0,506064                         | II 0,790257 | II 1,9712   |
| 0,510554                            | II 0,798817 | II 2,0006   |

Активная среда Mg. Условия возбуждения: импульсный и непрерывный разряды в парах Mg с He, Ne или Ar

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |            |         |
|-------------------------------------|------------|---------|
| 0,9218                              | II 2,40415 | 3,86573 |
| 0,9244                              | II 2,41245 | 4,20018 |
| 1,0952                              | 3,67794    | 4,36269 |
| 1,0915                              | 3,68154    |         |

Активная среда Са. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров Са и He; оптическая накачка паров Са ультрафиолетовым излучением; разряд с полым катодом

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| 0,535                               | 0,6162      | II 0,866214 |
| 0,586                               | 0,644981    | 1,9853      |
| 0,6102                              | 0,6717      | 5,5457      |
| 0,6122                              | II 0,854209 |             |

Активная среда Ag. Условия возбуждения: непрерывный разряд с серебряным полым катодом и с He или Ne в качестве буферного газа

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |            |           |
|-------------------------------------|------------|-----------|
| II 0,22434                          | II 0,83795 | II 1,7674 |
| II 0,22774                          | II 0,84032 | 1,8380    |
| II 0,31807                          | II 0,87476 | II 1,8408 |
| II 0,40859                          | II 0,8772  | II 1,8463 |
| II 0,47884                          | II 1,3759  | II 1,8725 |
| II 0,50273                          | II 1,5982  | II 1,8795 |
| II 0,64027                          | II 1,6462  | II 1,8979 |
| II 0,80054                          | II 1,6656  | 1,9370    |
| II 0,82547                          | II 1,7203  | II 1,9714 |
| II 0,8263                           | II 1,7345  | II 1,9823 |
| II 0,83244                          | II 1,7478  | II 2,0796 |

Активная среда Sr. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Sr с He; разряд с полым катодом

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |  |        |
|-------------------------------------|--|--------|
| 0,638075                            |  | 3,0111 |
| II 1,033014                         |  | 6,4567 |
| II 1,091797                         |  |        |

Активная среда Ва. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Ва с He, Ne, Ar или H<sub>2</sub>; разряд с полым катодом

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|
| II 0,614172                         | 2,4758 | 4,6706 |
| II 0,649690                         | 2,5515 | 4,7156 |
| 0,712033                            | 2,5924 | 4,7171 |
| 1,1303                              | 2,9057 | 5,0309 |
| 1,5000                              | 2,9227 | 5,4798 |
| 1,82                                | 3,9578 | 5,5636 |
| 1,9017                              | 4,0069 | 5,8899 |
| 2,1568                              | 4,33   | 6,4546 |
| 2,3254                              |        |        |

Активная среда Au. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Au с He; непрерывный разряд с полым золотым катодом и He в качестве буферного газа

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |            |            |
|-------------------------------------|------------|------------|
| 0,2428                              | II 0,29182 | II 0,69403 |
| II 0,25337                          | II 0,29594 | II 0,75558 |
| II 0,26165                          | 0,3122     | II 0,75929 |
| 0,2676                              | II 0,55163 | II 0,76005 |
| II 0,28225                          | II 0,55221 | II 0,76067 |
| II 0,28470                          | II 0,62123 | II 0,76351 |
| II 0,28633                          | 0,627818   | II 0,82729 |
| II 0,28882                          | II 0,67014 | II 0,88676 |
| II 0,28933                          | II 0,69029 |            |

Активная среда Be. Условия возбуждения: импульсное возбуждение паров Be с He или Ne в качестве буферного газа

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| 0,4675                              | II 0,610253 | II 0,77325  |
| 0,5272                              | II 0,747879 | II 0,775786 |
| 1,2096                              | II 0,758848 | II 1,8308   |
|                                     | II 0,761290 | II 5,0848   |

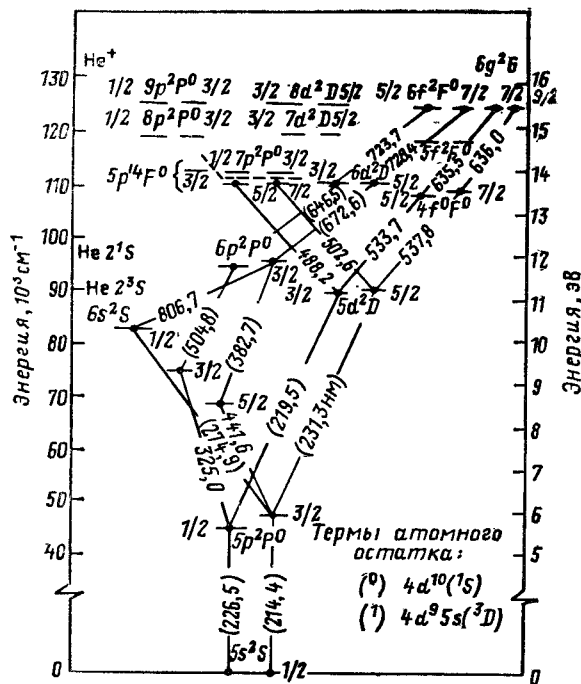


Рис. 34.4. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в Cd II [5]. В скобках указаны  $\lambda$ , для которых наблюдались только спонтанные переходы

## Продолжение табл. 34.2

Активная среда Cd (рис. 34.4). Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах Cd с He или Ne; непрерывный разряд с полым катодом из Cd; импульсное возбуждение при диссоциации  $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

|             |            |        |
|-------------|------------|--------|
| II 0,3250   | II 0,63601 | 1,43   |
| II 0,441563 | II 0,72369 | 1,45   |
| II 0,48820  | II 0,78443 | 1,64   |
| II 0,50259  | II 0,80669 | 3,2882 |
| II 0,533749 | II 0,85300 | 13,185 |
| II 0,537804 | II 0,88778 | 14,578 |
| II 0,63548  | 1,4        |        |

Активная среда Hg. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров Hg (0,13 Па) и He (130 Па); разряд с полым катодом; импульсное возбуждение при диссоциации  $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

|              |            |           |
|--------------|------------|-----------|
| III 0,365    | II 0,8622  | II 1,5295 |
| III 0,479701 | II 0,8677  | II 1,5555 |
| III 0,5210   | II 0,93968 | 1,6920    |
| II 0,5461    | II 1,0583  | 1,6942    |
| II 0,56773   | 1,11768    | 1,7073    |
| II 0,61499   | 1,2222     | 1,71099   |
| III 0,65015  | 1,2246     | 1,7329    |
| II 0,7065    | 1,2545     | 1,8130    |
| II 0,73466   | 1,2760     | 3,93      |
| II 0,74181   | 1,2981     | 5,88      |
| II 0,79447   | 1,3655     | 5,9817    |
| II 0,85498   | 1,3675     | 6,49      |

Активная среда В. Условия возбуждения: импульсный разряд в  $\text{BCl}_3$  при  $P = 70$  Па

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

II 0,345134

Активная среда Al. Условия возбуждения: электрический разряд с полым катодом; буферный газ He или Ne

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

II 0,358744

II 0,691996

II 0,704206

II 0,705656

II 0,747137

Активная среда Ga. Условия возбуждения: импульсное возбуждение при диссоциации  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ ; фотодиссоциация GaI

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

0,4172

1,7363

5,7534

6,1460

Активная среда In. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах In с He или Ne, импульсное возбуждение при диссоциации  $\text{In}(\text{CH}_3)_3$

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

0,4511

0,468082

1,8732

2,3779

Активная среда Tl. Условия возбуждения: короткий разряд в Tl (13 Па) с Ne или He; импульсное возбуждение при диссоциации  $\text{Tl}(\text{CH}_3)_3$ ; разряд с полым катодом

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

0,5152

0,53503

0,5949

0,6950

3,8125

5,1059

10,449

Активная среда С. Условия возбуждения: линии ионизованного С возбуждаются при импульсном разряде в  $\text{CO}_2$  или воздухе; атомарные линии возбуждаются при непрерывном разряде в СО или  $\text{CO}_2$  (1,3 Па) и He или Ne (250 Па)

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

0,15482

0,15508

0,464745

0,465016

0,49541

0,51457

0,65780

0,67838

1,0691

1,4540

2,0645

3,4046

3,5155

5,5956

Активная среда Si. Условия возбуждения: линии ионизованного Si при импульсном разряде PFe: пары Si образуются при взаимодействии со стенками разрядной полости; атомарные линии при импульсном разряде  $\text{SiCl}_4$

 $\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

0,455259

0,456784

0,634724

0,637148

0,667193

1,1984

1,2034

1,5883

Активная среда Ge. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Ge с He или Ne; диссоциация  $\text{GeCl}_4$  в импульсном разряде

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|          |        |
|----------|--------|
| 0,513175 | 1,9809 |
| 0,517865 | 2,0200 |

Активная среда Sn. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Sn с Ne или He; непрерывное возбуждение смеси He или Ne с Sn при  $P = 0,2 \text{ Па}$

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|          |          |        |
|----------|----------|--------|
| 0,5589   | 0,684405 | 1,062  |
| 0,579918 | 0,6579   | 1,074  |
| 0,645350 | 1,061    | 4,6146 |

Активная среда Pb. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Pb с He, Ne или Ag; диссоциация  $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$  в импульсном разряде

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|          |         |
|----------|---------|
| 0,363954 | 0,72291 |
| 0,405779 | 3,1738  |
| 0,4062   | 7,1740  |
| 0,53721  | 7,9399  |

Активная среда N. Условия возбуждения: для ионизованного N — импульсный разряд в воздухе,  $\text{N}_2$  или  $\text{NH}_3$  при  $P = 1,3 \div 13 \text{ Па}$ ; атомарные линии при импульсном разряде в  $\text{N}_2$  или смеси  $\text{N}_2$  с He

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|              |             |         |
|--------------|-------------|---------|
| III 0,336734 | II 0,566663 | 1,0568  |
| IV 0,347867  | II 0,567601 | 1,0611  |
| IV 0,348296  | 0,567956    | 1,0623  |
| II 0,399501  | 0,8594      | 1,34295 |
| III 0,409732 | 0,87284     | 1,35818 |
| III 0,410338 | 0,90455     | 1,45423 |
| III 0,451088 | 0,93862     | 3,7942  |
| III 0,451487 | 0,93921     | 3,8154  |
| II 0,463055  |             |         |

Активная среда P. Условия возбуждения: импульсный разряд в  $\text{PF}_5$  при  $P = 5 \text{ Па}$ ; импульсный разряд в парах P при  $P = 0,3 \div 30 \text{ Па}$  с He или Ne в качестве буферного газа

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|              |             |       |
|--------------|-------------|-------|
| IV 0,334769  | II 0,616577 | 1,154 |
| III 0,442208 | 0,667193    | 1,178 |
| II 0,602421  | 0,784563    | 1,571 |
| II 0,603421  | 1,008       | 1,648 |
| II 0,604325  | 1,116       | 1,894 |
| II 0,608786  | 1,119       | 2,060 |

Активная среда As. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах As и Ne (13 Па); непрерывный разряд в смеси As и He с полым катодом; диссоциация  $\text{AsCl}_3$  при импульсном разряде

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|             |        |        |
|-------------|--------|--------|
| II 0,538520 | 1,045  | 1,463  |
| II 0,549695 | 1,061  | 1,8049 |
| II 0,549773 | 1,124  | 1,807  |
| II 0,555809 | 1,4255 | 1,9750 |
| II 0,56516  | 1,1519 | 2,0277 |
| II 0,583790 | 1,152  | 2,4460 |
| II 0,617027 | 1,1521 | 2,9805 |
| II 0,651174 | 1,294  | 5,2865 |
| II 0,710272 | 1,412  |        |

Активная среда Sb. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Sb (0,3 Па) и Ne (30 Па); диссоциация  $\text{Sb}(\text{CH}_3)_3$  в импульсном разряде

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|         |
|---------|
| 0,61299 |
| 12,033  |

Активная среда Bi. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Bi с He или в  $\text{Bi}(\text{CH}_3)_3$  с He

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|              |             |            |
|--------------|-------------|------------|
| III 0,456084 | II 0,571921 | II 0,80689 |
| 0,4722       | III 0,75990 | 5,3284     |

Активная среда V. Условия возбуждения: диссоциация  $\text{VCl}_4$  в импульсном разряде

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|        |
|--------|
| 2,0195 |
| 2,4473 |

Активная среда O. Условия возбуждения: все линии ионизованного O в импульсном разряде при  $P = 0,13 \div 13 \text{ Па}$  и плотности тока  $500\text{—}2000 \text{ А/см}^2$ ; почти все линии атомарного O наблюдаются в непрерывном режиме в газовой смеси  $\text{O}_2$  с Ag или  $\text{O}_2$  с Ne

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ 

|              |              |          |
|--------------|--------------|----------|
| V 0,2640     | II 0,434738  | 0,844672 |
| V 0,278139   | II 0,435128  | 0,844680 |
| III 0,298378 | II 0,441488  | 2,652    |
| III 0,304713 | II 0,441697  | 2,89     |
| IV 0,306345  | II 0,460552  | 4,5607   |
| IV 0,338128  | II 0,464914  | 4,5632   |
| IV 0,338133  | III 0,559237 | 5,981    |
| IV 0,338554  | II 0,66402   | 6,8161   |
| II 0,374949  | 0,672136     | 6,858    |
| III 0,375426 | 0,844628     | 6,8731   |
| III 0,375467 | 0,844638     | 10,400   |
| III 0,375988 |              |          |

Активная среда S. Условия возбуждения: все линии ионизированной S в импульсном высокоточном разряде в SO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub> или H<sub>2</sub>S при P = 1,3 ÷ 7 Па: линии атомарного S в импульсном или непрерывном разряде в парах S с Ne

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| III 0,2638964                       | II 0,532088 | II 0,581935 |
| III 0,3324859                       | II 0,534583 | 0,7725      |
| III 0,3497332                       | II 0,542874 | 1,0455      |
| III 0,3709354                       | II 0,543287 | 1,0636      |
| II 0,492560                         | II 0,545388 | 1,402       |
| II 0,50116                          | II 0,547374 | 1,5422      |
| II 0,501424                         | II 0,556511 | 1,6543      |
| II 0,503262                         | II 0,550990 | 2,4363      |
| II 0,516032                         | II 0,564012 | 2,7799      |
| II 0,521962                         | II 0,564716 | 3,3892      |

Активная среда Se. Условия возбуждения: все линии возбуждаются в непрерывном режиме; плотность тока 1,5—15 А/см<sup>2</sup>; газовая смесь Se(0,7 Па) и He(0,8—1,1 кПа)

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| II 0,446760                         | II 0,522751 | II 0,644425 |
| II 0,460434                         | II 0,525307 | II 0,649048 |
| II 0,461877                         | II 0,525363 | II 0,653995 |
| II 0,464844                         | II 0,527111 | II 0,706389 |
| II 0,471823                         | II 0,530535 | II 0,739199 |
| II 0,474097                         | II 0,552242 | II 0,767482 |
| II 0,476365                         | II 0,556693 | II 0,772404 |
| II 0,476552                         | II 0,559116 | 0,777       |
| II 0,484063                         | II 0,562313 | II 0,779615 |
| II 0,484496                         | II 0,569788 | II 0,783881 |
| II 0,489                            | II 0,574762 | II 0,830952 |
| II 0,497566                         | II 0,584268 | II 0,92493  |
| II 0,499275                         | II 0,586627 | II 0,995515 |
| II 0,506865                         | II 0,605596 | II 1,040881 |
| II 0,509650                         | II 0,606583 | II 1,258678 |
| II 0,514214                         | II 0,610196 | 6,3672      |
| II 0,517598                         |             |             |

Активная среда Te. Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах Te; диссоциация в импульсном разряде Te(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |            |            |
|-------------------------------------|------------|------------|
| II 0,48429                          | II 0,57563 | II 0,68851 |
| II 0,50204                          | II 0,58511 | II 0,70391 |
| II 0,52564                          | II 0,59361 | II 0,78017 |
| II 0,54498                          | II 0,59726 | II 0,79217 |
| II 0,54540                          | II 0,59747 | II 0,86046 |
| II 0,54791                          | II 0,60145 | II 0,87338 |
| II 0,55702                          | II 0,60823 | II 0,89721 |
| II 0,55764                          | II 0,62307 | II 0,88982 |
| II 0,56405                          | II 0,62454 | II 0,93779 |
| II 0,56662                          | II 0,63497 | 3,1720     |
| II 0,57081                          | II 0,65851 | 6,7595     |
| II 0,57416                          | II 0,66486 | 7,7856     |
| II 0,57559                          | II 0,66761 |            |

Активная среда F. Условия возбуждения: импульсный разряд в F<sub>2</sub> при P = 3 Па или в смеси CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub> с He

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|
| III 0,275958                        | 0,696635  | 0,74257   |
| IV 0,282612                         | 0,70394   | 0,74827   |
| III 0,3121501                       | 0,703745  | 0,748914  |
| III 0,317413                        | 0,712788  | 0,75150   |
| II 0,320276                         | 0,71298   | 0,7552235 |
| II 0,402472                         | 0,720237  | 0,775470  |
| 0,6239651                           | 0,72043   | 0,780022  |
| 0,6348508                           | 0,7310102 | 1,5900    |
| 0,6413651                           | 0,7398688 | 9,3462    |

Активная среда Cl. Условия возбуждения: ультрафиолетовые линии ионизованного Cl генерируют только в импульсном режиме при P = 0,3 Па; линии видимого диапазона возбуждаются непрерывно при P = 7 Па; линии атомарного Cl возбуждаются в HCl или в смеси Cl<sub>2</sub> и He

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| III 0,2632686                       | II 0,413250 | II 0,522136 |
| III 0,3191424                       | II 0,474042 | II 0,539216 |
| III 0,3392861                       | II 0,476871 | II 0,609473 |
| III 0,3393444                       | II 0,478134 | 0,9451      |
| III 0,3530016                       | II 0,489685 | 1,3859      |
| III 0,3560632                       | II 0,490483 | 1,3891      |
| III 0,360210                        | II 0,491781 | 1,9755      |
| III 0,361283                        | II 0,507829 | 2,0199      |
| III 0,362268                        | II 0,510310 | 2,4466      |
| III 0,3720436                       | II 0,512776 | 3,0664      |
| III 0,3748770                       |             |             |

Активная среда Br. Условия возбуждения: непрерывный разряд в HBr; импульсный разряд в Br<sub>2</sub> при P = 5 Па

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |        |
|-------------------------------------|-------------|--------|
| IV 0,2362465                        | II 0,518238 | 2,2854 |
| IV 0,2581246                        | II 0,523826 | 2,3511 |
| III 0,2787619                       | II 0,533203 | 2,714  |
| II 0,474266                         | II 0,611756 | 2,8375 |
| II 0,505463                         | II 0,616878 |        |

Активная среда I. Условия возбуждения: импульсный разряд в I при P = 13 Па и в He при P = 250 ÷ 500 Па; импульсный или непрерывный разряд в HI или в смеси I и He

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{MKM}$ |             |        |
|-------------------------------------|-------------|--------|
| II 0,448855                         | II 0,658521 | 1,06   |
| II 0,453379                         | II 0,606893 | 1,315  |
| II 0,467440                         | II 0,620486 | 1,4542 |
| II 0,467553                         | II 0,662235 | 1,553  |
| II 0,493467                         | II 0,682523 | 2,5986 |
| II 0,498692                         | II 0,690477 | 2,7572 |
| II 0,521408                         | II 0,703299 | 3,0360 |
| II 0,521627                         | II 0,713897 | 3,2363 |
| II 0,540736                         | II 0,761850 | 3,4296 |
| II 0,5419                           | II 0,773578 | 4,331  |
| II 0,559312                         | II 0,817001 | 4,858  |
| II 0,562569                         | II 0,825381 | 4,8619 |
| II 0,567808                         | II 0,880428 | 5,4972 |
| II 0,576072                         | II 0,887761 | 6,7198 |
| II 0,612749                         | 0,58        | 6,902  |
| II 0,633997                         | 1,01        | 9,326  |
| II 0,651618                         | 1,03        |        |

Активная среда Мп. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Мп и Не

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |          |         |
|--------------------------------------|----------|---------|
| 0,534106                             | 0,553776 | 1,36267 |
| 0,542036                             | 1,28998  | 1,38642 |
| 0,547064                             | 1,32938  | 1,39975 |
| 0,551677                             | 1,33190  |         |

Активная среда Sm. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Sm с He, Ne или Ar

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |        |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| 1,912                                | 2,6998 | 3,4654 | 4,1368 |
| 2,0482                               | 2,9663 | 3,5361 | 4,8656 |

Активная среда Eu. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Eu с He, Ne или Ar

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|
| II 0,6645                            | 1,66   | 5,0647 |
| II 0,9898                            | 1,7596 | 5,2811 |
| II 1,002                             | 2,5811 | 5,4292 |
| II 1,016                             | 2,7174 | 5,7706 |
| II 1,361                             | 4,3202 | 5,9479 |
| II 1,477                             | 4,6935 | 6,0576 |

Активная среда Tm. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Tm с He, Ne или Ar

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|
| 1,304                                | 1,500    | 1,973    |
| 1,310058                             | 1,637914 | 1,994160 |
| 1,338008                             | 1,675404 | 2,107    |
| 1,433973                             | 1,7319   | 2,384515 |
| 1,448509                             | 1,958443 |          |

Активная среда Yb. Условия возбуждения: импульсный разряд в парах Yb с He, Ne или Ar

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |           |           |
|--------------------------------------|-----------|-----------|
| 1,0322                               | II 1,6498 | 2,0036    |
| 1,2548                               | 1,7454    | 2,1181    |
| II 1,2714                            | 1,7977    | II 2,1480 |
| II 1,3453                            | II 1,8057 | II 2,4377 |
| 1,4280                               | 1,9830    | 4,8009    |
| 1,4787                               |           |           |

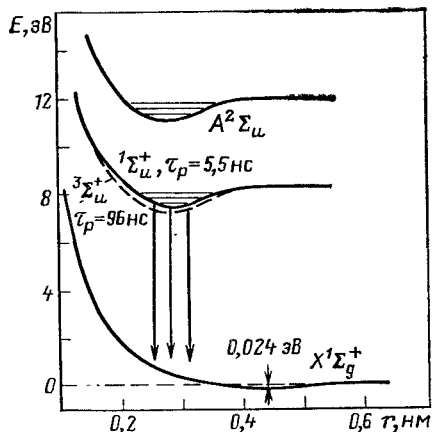


Рис. 34.5. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней молекулы  $\text{Xe}_2$  [1]. Генерация наблюдается на переходах из устойчивых колебательных уровней состояния  $1\Sigma_u^+$  в отталкивательное состояние  $X^1\Sigma_g^+$ ;  $\tau_p$  — радиационное время жизни верхнего рабочего состояния

Лазерные переходы в двухатомных молекулах

Активная среда  $\text{Xe}_2$  (рис. 34.5),  $\text{Ar}_2$ ,  $\text{Kr}_2$ . Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком благородных газов при высоком давлении

| Молекула      | $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |
|---------------|--------------------------------------|
| $\text{Xe}_2$ | 0,1722                               |
| $\text{Ar}_2$ | 0,1261                               |
| $\text{Kr}_2$ | 0,1457                               |

Активная среда  $\text{ArF}$ ,  $\text{ArCl}$ ,  $\text{KrF}$  и т. д. Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси благородных газов и галогенидов при высоком давлении; также поперечный разряд при атмосферном давлении

| Молекула      | $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ | Молекула      | $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |
|---------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| $\text{ArF}$  | 0,1933                               | $\text{XeCl}$ | 0,30792                              |
| $\text{ArCl}$ | 0,1750                               | $\text{XeCl}$ | 0,30816                              |
| $\text{KrBr}$ | 0,2065                               | $\text{XeF}$  | 0,34875                              |
| $\text{KrCl}$ | 0,2229                               | $\text{XeF}$  | 0,35091                              |
| $\text{KrF}$  | 0,2481                               | $\text{XeF}$  | 0,35097                              |
| $\text{KrF}$  | 0,2484                               | $\text{XeF}$  | 0,35114                              |
| $\text{KrF}$  | 0,2485                               | $\text{XeF}$  | 0,35365                              |
| $\text{KrF}$  | 0,2495                               | $\text{XeF}$  | 0,35354                              |
| $\text{XeBr}$ | 0,2818                               | $\text{XeF}$  | 0,483                                |

Активная среда  $\text{XeO}$ ,  $\text{KrO}$ . Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси благородных газов и  $\text{O}_2$  при высоком давлении

| Молекула     | $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ | Молекула     | $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |
|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| $\text{XeO}$ | 0,5300                               | $\text{ArO}$ | 0,5377                               |
| $\text{XeO}$ | 0,5550                               | $\text{ArO}$ | 0,55781                              |

Активная среда  $\text{HgBr}$ ,  $\text{HgCl}$ . Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком при высоком давлении; фотодиссоциация или диссоциация  $\text{HgBr}_2$  в электрическом разряде

| Молекула      | $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ | Молекула      | $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |
|---------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| $\text{HgBr}$ | 0,5018                               | $\text{HgBr}$ | 0,5042                               |
| $\text{HgBr}$ | 0,5020                               | $\text{HgBr}$ | 0,5046                               |
| $\text{HgBr}$ | 0,5023                               | $\text{HgBr}$ | 0,55762                              |
| $\text{HgBr}$ | 0,5026                               | $\text{HgBr}$ | 0,55835                              |
| $\text{HgBr}$ | 0,5039                               |               |                                      |

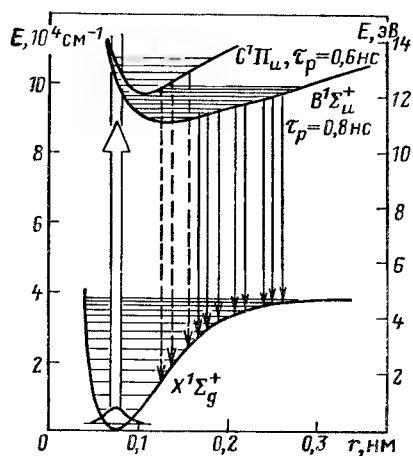


Рис. 34.6. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней лазера на молекулах  $H_2$  [1]. Лазерные переходы на системе полос Лаймана ( $B \rightarrow X$ ) отмечены вертикальными стрелками вниз (сплошные линии), переходы Вернера ( $C \rightarrow X$ ) — пунктиром. Вертикальная стрелка из основного колебательного состояния  $X_{v=0}$  вверх соответствует переходам при электронном возбуждении;  $\tau_p$  — радиационное время жизни верхнего рабочего состояния

## Продолжение табл. 34.2

Активная среда  $H_2$  (рис. 34.6). Условия возбуждения: импульсный разряд в  $H_2$  при  $P = 13$  Па; возбуждение электронным пучком (400 кэВ)  $H_2$  при  $P = 1,3 \div 13$  кПа; линии параводорода обозначены  $H_2P$

| Молекула | $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ | Молекула | $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| $H_2$    | 0,115976                            | $H_2P$   | 0,114462                            |
| $H_2$    | 0,116136                            | $H_2P$   | 0,114862                            |
| $H_2$    | 0,116617                            | $H_2P$   | 0,116003                            |
| $H_2$    | 0,117436                            | $H_2P$   | 0,116390                            |
| $H_2$    | 0,117586                            | $H_2P$   | 0,117456                            |
| $H_2$    | 0,118050                            | $H_2P$   | 0,117830                            |
| $H_2$    | 0,118936                            | $H_2P$   | 0,120536                            |
| $H_2$    | 0,120497                            | $H_2P$   | 0,120929                            |
| $H_2$    | 0,120688                            | $H_2P$   | 0,121767                            |
| $H_2$    | 0,121734                            | $H_2P$   | 0,122143                            |
| $H_2$    | 0,121900                            | $H_2P$   | 0,122874                            |
| $H_2$    | 0,122358                            | $H_2P$   | 0,123230                            |
| $H_2$    | 0,123004                            | $H_2P$   | 0,123833                            |
| $H_2$    | 0,123956                            | $H_2P$   | 0,124167                            |
| $H_2P$   | 0,109816                            | $H_2P$   | 0,124620                            |
| $H_2P$   | 0,110205                            | $H_2P$   | 0,125202                            |
| $H_2P$   | 0,111515                            | $H_2P$   | 0,126839                            |
| $H_2P$   | 0,111894                            | $H_2$    | 0,134226                            |

| Молекула | $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ | Молекула | $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| $H_2$    | 0,140264                            | $H_2P$   | 0,140728                            |
| $H_2$    | 0,143622                            | $H_2P$   | 0,143262                            |
| $H_2$    | 0,159340                            | $H_2P$   | 0,143757                            |
| $H_2$    | 0,159606                            | $H_2P$   | 0,144061                            |
| $H_2$    | 0,144049                            | $H_2P$   | 0,146017                            |
| $H_2$    | 0,146383                            | $H_2P$   | 0,146411                            |
| $H_2$    | 0,14942                             | $H_2P$   | 0,146841                            |
| $H_2$    | 0,149522                            | $H_2P$   | 0,148652                            |
| $H_2$    | 0,151867                            | $H_2P$   | 0,149171                            |
| $H_2$    | 0,152325                            | $H_2P$   | 0,151570                            |
| $H_2$    | 0,155345                            | $H_2P$   | 0,151994                            |
| $H_2$    | 0,15655                             | $H_2P$   | 0,153494                            |
| $H_2$    | 0,156725                            | $H_2P$   | 0,154493                            |
| $H_2$    | 0,157199                            | $H_2P$   | 0,155010                            |
| $H_2$    | 0,15743                             | $H_2P$   | 0,156629                            |
| $H_2$    | 0,157739                            | $H_2P$   | 0,156644                            |
| $H_2$    | 0,157919                            | $H_2P$   | 0,156753                            |
| $H_2$    | 0,157998                            | $H_2P$   | 0,157434                            |
| $H_2$    | 0,158077                            | $H_2P$   | 0,157771                            |
| $H_2$    | 0,159131                            | $H_2P$   | 0,157998                            |
| $H_2$    | 0,160448                            | $H_2P$   | 0,158110                            |
| $H_2$    | 0,160623                            | $H_2P$   | 0,158140                            |
| $H_2$    | 0,160751                            | $H_2P$   | 0,158899                            |
| $H_2$    | 0,160839                            | $H_2P$   | 0,159340                            |
| $H_2$    | 0,160902                            | $H_2P$   | 0,159926                            |
| $H_2$    | 0,160829                            | $H_2P$   | 0,160236                            |
| $H_2$    | 0,161033                            | $H_2P$   | 0,160594                            |
| $H_2$    | 0,161166                            | $H_2P$   | 0,160623                            |
| $H_2$    | 0,161319                            | $H_2P$   | 0,160829                            |
| $H_2$    | 0,16148                             | $H_2P$   | 0,160844                            |
| $H_2$    | 0,16165                             | $H_2P$   | 0,160961                            |
| $H_2P$   | 0,121946                            | $H_2P$   | 0,161019                            |
| $H_2P$   | 0,133856                            | $H_2P$   | 0,161033                            |
| $H_2P$   | 0,135984                            | $H_2P$   | 0,161165                            |
| $H_2P$   | 0,136799                            | $H_2P$   | 0,161318                            |
| $H_2P$   | 0,139895                            | $H_2P$   | 0,161485                            |



| Молекула | $\lambda_{\text{возд}}, \text{мкм}$ | Молекула | $\lambda_{\text{возд}}, \text{мкм}$ |
|----------|-------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| H III    | 0,752464                            | H III    | 1,305662                            |
| H III    | 0,834950                            | H III    | 1,316109                            |
| H III    | 0,887613                            | H III    | 1,50                                |
| H III    | 0,889882                            | H III    | 1,564193                            |
| H III    | 1,116220                            | H III    | 1,581950                            |
| H III    | 1,122205                            | H III    | 1,63                                |

Активная среда  $D_2$ . Условия возбуждения: импульсный разряд в  $D_2$  при  $P = 13 \div 400$  Па; для возбуждения ультрафиолетового излучения нужен короткий (2,5 нс) интенсивный (сотни килоампер) разряд

 $\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$ 

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 0,111336 | 0,138879 | 0,16063  |
| 0,113770 | 0,143217 | 0,160650 |
| 0,114757 | 0,157585 | 0,160769 |
| 0,115650 | 0,158634 | 0,160681 |
| 0,118811 | 0,158642 | 0,160848 |
| 0,119753 | 0,158675 | 0,160955 |
| 0,120640 | 0,158714 | 0,161075 |
| 0,122800 | 0,158720 | 0,161080 |
| 0,123556 | 0,15890  | 0,161147 |
| 0,124239 | 0,15923  | 0,161165 |
| 0,124831 | 0,158983 | 0,161171 |
| 0,125329 | 0,159130 | 0,161198 |
| 0,115840 | 0,159137 | 0,161236 |
| 0,119005 | 0,159226 | 0,161251 |
| 0,119940 | 0,159257 | 0,161257 |
| 0,120821 | 0,160044 | 0,161318 |
| 0,124412 | 0,160086 | 0,161320 |
| 0,124997 | 0,160210 | 0,161324 |
| 0,130363 | 0,160354 | 0,161412 |
| 0,134590 | 0,160578 | 0,161658 |

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{мкм}$ 

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 0,827752 | 0,952367 | 1,477548 |
| 0,944156 | 0,953005 |          |

Активная среда HD. Условия возбуждения: импульсный разряд в HD при  $P = 13 \div 400$  Па

 $\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$ 

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 0,113864 | 0,151359 | 0,160365 |
| 0,114154 | 0,152989 | 0,160496 |
| 0,115198 | 0,156201 | 0,160465 |
| 0,117806 | 0,157136 | 0,160569 |
| 0,118995 | 0,157242 | 0,160647 |
| 0,119281 | 0,157267 | 0,160648 |
| 0,120103 | 0,158008 | 0,160674 |
| 0,121125 | 0,158085 | 0,160692 |
| 0,122837 | 0,158185 | 0,160747 |
| 0,124567 | 0,158253 | 0,160794 |
| 0,125276 | 0,158305 | 0,160827 |
| 0,130334 | 0,159378 | 0,160893 |
| 0,135507 | 0,159524 | 0,161005 |
| 0,140770 | 0,159713 | 0,161131 |
| 0,148843 | 0,160233 |          |

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{мкм}$ 

0,917201

Активная среда  $Na_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка лазерным излучением с длиной волны 473, 659, 454, 488 нм с He в качестве буферного газа при  $P = 4$  кПа

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{мкм}$ 

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 0,5250   | 0,5417   | 0,791783 |
| 0,526333 | 0,5421   | 0,792947 |
| 0,5279   | 0,544150 | 0,793697 |
| 0,529952 | 0,544694 | 0,797474 |
| 0,529816 | 0,5453   | 0,797657 |
| 0,5338   | 0,5459   | 0,799091 |
| 0,5326   | 0,5472   | 0,799660 |
| 0,534283 | 0,5474   | 0,80011  |
| 0,5345   | 0,5485   | 0,8002   |
| 0,534930 | 0,5490   | 0,800840 |
| 0,536902 | 0,5491   | 0,80154  |
| 0,5375   | 0,549158 | 0,803650 |
| 0,5376   | 0,5504   | 0,803931 |
| 0,537814 | 0,5562   | 0,804447 |
| 0,5381   | 0,5568   | 0,805366 |
| 0,538497 | 0,5596   | 0,805611 |
| 0,538635 | 0,784930 | 0,8066   |
| 0,5394   | 0,786590 | 0,806943 |
| 0,540244 | 0,789740 | 0,80715  |
| 0,541311 | 0,789790 | 0,80859  |

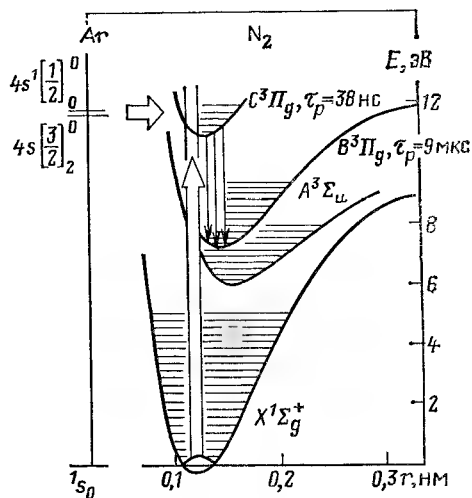


Рис. 34.7. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней лазера на молекулярном азоте в системе  $N_2 + Ar$  [1]. Вертикальная стрелка из основного состояния  $X_{v=0}$  вверх соответствует переходам при электронном возбуждении. Горизонтальная стрелка обозначает передачу энергии возбуждения с уровней аргона на верхний рабочий уровень азотного лазера;  $\tau_r$  — радиационное время жизни рабочего состояния

Активная среда  $N_2$ . Условия возбуждения: импульсный разряд высокой плотности в  $N_2$  при  $P = 130 \div 500$  Па. Возбуждение  $N_2$  электронным пучком (300—400 кэВ) при  $P = 2,7$  кПа, а также смеси Ar и  $N_2$  (рис. 34.7) при высокой плотности

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{мкм}$ 

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 0,315756 | 0,315827 | 0,315870 |
| 0,315778 | 0,315832 | 0,315874 |
| 0,315798 | 0,315844 | 0,315883 |
| 0,315803 | 0,315853 | 0,315891 |
| 0,315816 | 0,315861 | 0,315900 |

|           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,315911  | 0,4058    | 0,7511799 | 0,7628854 | 0,8710273 | 0,8889738 |
| 0,315919  | 0,4278    | 0,7512003 | 0,7629102 | 0,8712956 | 0,8890243 |
| 0,3364909 | 0,7482187 | 0,7512569 | 0,7630305 | 0,8713533 | 0,8891133 |
| 0,3365425 | 0,748274  | 0,7513357 | 0,7631880 | 0,871450  | 0,8891769 |
| 0,3365478 | 0,7485941 | 0,7514079 | 0,7632446 | 0,8715519 | 0,8892149 |
| 0,3366913 | 0,7486135 | 0,7515446 | 0,7633348 | 0,871644  | 0,8892940 |
| 0,3369541 | 0,7486413 | 0,7515650 | 0,7633985 | 0,8716718 | 0,8896001 |
| 0,3369552 | 0,7486253 | 0,7517728 | 0,7634546 | 0,8717377 | 0,8898930 |
| 0,3369769 | 0,7487409 | 0,7518013 | 0,7634779 | 0,8717970 | 0,8899078 |
| 0,3369823 | 0,7488046 | 0,7574329 | 0,7635474 | 0,8718571 | 0,8901733 |
| 0,3369835 | 0,7488246 | 0,758105  | 0,7636126 | 0,8719562 | 0,8902420 |
| 0,3369907 | 0,7489107 | 0,758423  | 0,7636904 | 0,8719562 | 0,8902711 |
| 0,3370027 | 0,7489626 | 0,7586439 | 0,7637586 | 0,8719571 | 0,890372  |
| 0,3370075 | 0,7489809 | 0,7587693 | 0,7638274 | 0,8719791 | 0,8904419 |
| 0,3370081 | 0,7490096 | 0,7589868 | 0,7639715 | 0,8720251 | 0,890566  |
| 0,3370137 | 0,7490317 | 0,7591960 | 0,7640383 | 0,8720284 | 0,8906097 |
| 0,3370174 | 0,7491510 | 0,7593908 | 0,7640794 | 0,8720308 | 0,8906649 |
| 0,3370288 | 0,7491705 | 0,7594941 | 0,7641929 | 0,8720419 | 0,8906994 |
| 0,3370295 | 0,7492379 | 0,7597289 | 0,7642478 | 0,8720848 | 0,8907920 |
| 0,3370312 | 0,7493082 | 0,759870  | 0,7644612 | 0,8721155 | 0,8908808 |
| 0,3370381 | 0,7493716 | 0,7603477 | 0,771206  | 0,8721327 | 0,8908878 |
| 0,3370438 | 0,7493910 | 0,7606374 | 0,7724562 | 0,8721718 | 0,8909451 |
| 0,3370466 | 0,7495086 | 0,7607626 | 0,7730032 | 0,8721971 | 0,8909527 |
| 0,3370474 | 0,7495465 | 0,7608401 | 0,7735040 | 0,8722007 | 0,8909750 |
| 0,3370555 | 0,7495660 | 0,7609553 | 0,7739632 | 0,8722220 | 0,8910132 |
| 0,3370562 | 0,7496024 | 0,7613612 | 0,7743859 | 0,8722341 | 0,8910480 |
| 0,3370608 | 0,7497256 | 0,7610759 | 0,775270  | 0,8722569 | 0,8910612 |
| 0,3370619 | 0,7497524 | 0,7611082 | 0,7753652 | 0,8722836 | 0,8911001 |
| 0,3370665 | 0,7497728 | 0,7611514 | 0,865331  | 0,8723057 | 0,8911063 |
| 0,3370677 | 0,7498898 | 0,7612105 | 0,865492  | 0,8726333 | 0,8911280 |
| 0,3370714 | 0,7499013 | 0,7612528 | 0,866089  | 0,8728430 | 0,8911502 |
| 0,3370726 | 0,7499327 | 0,7613260 | 0,866256  | 0,8730453 | 0,8911538 |
| 0,3370749 | 0,7499593 | 0,7615347 | 0,866345  | 0,8732394 | 0,8911608 |
| 0,3370758 | 0,7499825 | 0,7616994 | 0,866572  | 0,8734247 | 0,8911898 |
| 0,3370782 | 0,7500071 | 0,7617357 | 0,86676   | 0,8735995 | 0,8912139 |
| 0,3370797 | 0,7500646 | 0,7619288 | 0,8669223 | 0,8737644 | 0,8918033 |
| 0,3370812 | 0,7500734 | 0,7620844 | 0,866959  | 0,8739162 | 0,8920184 |
| 0,3370816 | 0,7501056 | 0,7620943 | 0,8671332 | 0,8740559 | 0,8922249 |
| 0,3370826 | 0,7501295 | 0,7621161 | 0,867554  | 0,8742917 | 0,8924223 |
| 0,3370919 | 0,7501404 | 0,7622235 | 0,867554  | 0,884129  | 0,8926099 |
| 0,3370986 | 0,7501553 | 0,7622565 | 0,868281  | 0,8845349 | 0,8927865 |
| 0,3371031 | 0,7502139 | 0,7622959 | 0,8682937 | 0,8846598 | 0,8929509 |
| 0,3371075 | 0,7502729 | 0,7623256 | 0,868374  | 0,884758  | 0,8931019 |
| 0,3371082 | 0,7502768 | 0,7623264 | 0,868762  | 0,884920  | 0,8933580 |
| 0,3371113 | 0,7503035 | 0,7423311 | 0,869136  | 0,885026  | 0,965389  |
| 0,3371121 | 0,7503371 | 0,7623582 | 0,8692580 | 0,885261  | 0,965846  |
| 0,3371135 | 0,7503418 | 0,7623686 | 0,869490  | 0,885460  | 0,965846  |
| 0,3371143 | 0,7503642 | 0,7623918 | 0,8696366 | 0,8856271 | 0,967599  |
| 0,3371172 | 0,7503669 | 0,7624220 | 0,8697945 | 0,885649  | 0,967270  |
| 0,3371266 | 0,7503697 | 0,7624690 | 0,8698263 | 0,8858470 | 0,967758  |
| 0,3371307 | 0,7503838 | 0,7624924 | 0,8699397 | 0,8861195 | 0,967943  |
| 0,3371366 | 0,7503960 | 0,7625115 | 0,8700670 | 0,886153  | 0,968061  |
| 0,3371392 | 0,7503994 | 0,7625445 | 0,8700684 | 0,886256  | 0,969552  |
| 0,3371421 | 0,7504106 | 0,7625709 | 0,8701481 | 0,886278  | 0,969879  |
| 0,3371429 | 0,7504160 | 0,7625770 | 0,8701718 | 0,886697  | 1,043588  |
| 0,3386428 | 0,7504184 | 0,7625812 | 0,8702541 | 0,886799  | 1,044261  |
| 0,3575460 | 0,7504274 | 0,7625906 | 0,8702681 | 0,887121  | 1,044992  |
| 0,3575798 | 0,7504598 | 0,7626007 | 0,8703093 | 0,887531  | 1,045519  |
| 0,3575980 | 0,7504768 | 0,7626044 | 0,870331  | 0,8880521 | 1,046117  |
| 0,3576112 | 0,7505113 | 0,7626114 | 0,8703457 | 0,888288  | 1,046669  |
| 0,3576194 | 0,7505710 | 0,7626180 | 0,8704549 | 0,8884527 | 1,047195  |
| 0,3576250 | 0,7505903 | 0,7626207 | 0,8707478 | 0,8886204 | 1,047691  |
| 0,3576320 | 0,7506063 | 0,7626360 | 0,8710118 | 0,8886378 | 1,047961  |
| 0,3576571 | 0,7506356 | 0,7626560 |           | 0,8887756 | 1,048173  |
| 0,3576613 | 0,7508145 | 0,7626700 |           | 0,8889111 | 1,048634  |
| 0,3576778 | 0,7509890 | 0,7626749 |           |           | 1,049060  |
| 0,3576899 | 0,7510133 | 0,7626826 |           |           |           |
| 0,3576955 | 0,7510923 | 0,7627806 |           |           |           |
| 0,3804    | 0,7511592 |           |           |           |           |

|          |          |         |
|----------|----------|---------|
| 1,049478 | 1,230261 | 3,31149 |
| 1,049873 | 1,231093 | 3,31526 |
| 1,050231 | 1,231881 | 3,31801 |
| 1,050512 | 1,232624 | 3,45118 |
| 1,050717 | 1,233333 | 3,45758 |
| 1,05083  | 1,233994 | 3,46283 |
| 1,052259 | 1,234631 | 3,46709 |
| 1,052622 | 3,29372  | 3,47032 |
| 1,053093 | 3,30076  | 8,18161 |
| 1,053471 | 3,30665  | 8,20882 |

Активная среда  $F_2$ . Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси  $Ne$  и  $F_2$  или  $He$  и  $F_2$ ; также возбуждение в электрическом разряде

$\lambda_{вак}$ , МКМ

0,15671  
0,15748  
0,15759

Активная среда  $Bг_2$ . Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком или в электрическом разряде смеси  $Ag$  и  $Bг_2$

$\lambda_{вак}$ , МКМ

|         |         |         |
|---------|---------|---------|
| 0,2915  | 0,61318 | 0,67456 |
| 0,55020 | 0,61368 | 0,67506 |
| 0,55053 | 0,63612 | 0,74582 |
| 0,58048 | 0,63654 | 0,74638 |
| 0,58090 | 0,63705 | 0,74641 |
| 0,61272 | 0,67408 | 0,74704 |
| 0,61316 | 0,67455 |         |

Активная среда  $Cl_2$ . Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси  $Cl_2$  (300 Па) и  $He$  (1,2 МПа)

$\lambda_{возд}$ , МКМ

0,2580

Активная среда  $I_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка паров  $I_2$  аргоновым лазером или лазером на красителе; ультрафиолетовые линии возбуждаются электронным пучком в смеси  $Ag$  и  $Cl_3D$ , а также при накачке импульсными лампами

$\lambda_{возд}$ , МКМ

|          |        |         |
|----------|--------|---------|
| 0,3420   | 0,6592 | 1,1207  |
| 0,3423   | 0,6645 | 1,1214  |
| 0,3424   | 0,6936 | 1,1215  |
| 0,3428   | 0,7114 | 1,1224  |
| 0,5543   | 0,8144 | 1,1255  |
| 0,5550   | 0,8358 | 1,1327  |
| 0,5567   | 0,8578 | 1,1336  |
| 0,5680   | 0,8804 | 1,1347  |
| 0,5697   | 0,8813 | 1,1349  |
| 0,5745   | 0,9037 | 1,1350  |
| 0,5764   | 0,9047 | 1,1454  |
| 0,5815   | 0,9060 | 1,1464  |
| 0,5830   | 0,9274 | 1,20359 |
| 0,5880   | 0,9288 | 1,217   |
| 0,5905   | 0,9295 | 1,25623 |
| 0,5969   | 0,9305 | 1,25663 |
| 0,6025   | 0,9518 | 1,26324 |
| 0,6048   | 0,9545 | 1,274   |
| 0,6110   | 0,9555 | 1,27883 |
| 0,617482 | 0,9766 | 1,27945 |
| 0,617676 | 0,9963 | 1,28177 |
| 0,617868 | 0,9973 | 1,28210 |
| 0,617947 | 1,0019 | 1,28433 |
| 0,618193 | 1,0053 | 1,28478 |
| 0,618267 | 1,0225 | 1,2870  |
| 0,618441 | 1,0245 | 1,28722 |
| 0,618538 | 1,0255 | 1,28754 |
| 0,6198   | 1,0274 | 1,28931 |
| 0,6258   | 1,0534 | 1,28972 |
| 0,6330   | 1,0775 | 1,2925  |
| 0,6352   | 1,0788 | 1,294   |
| 0,6490   | 1,1068 | 1,304   |
| 0,6511   | 1,1073 | 1,30509 |

Активная среда  $Bi_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка аргоновым лазером и лазерами на красителях

$\lambda_{возд}$ , МКМ

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 0,5929 | 0,6550 | 0,7398 |
| 0,6160 | 0,6809 | 0,7408 |
| 0,6239 | 0,7006 | 0,7439 |
| 0,6300 | 0,7013 | 0,7468 |
| 0,6339 | 0,7292 | 0,7471 |
| 0,6414 | 0,7301 | 0,7475 |
| 0,6422 | 0,7335 | 0,7482 |
| 0,6576 | 0,7364 | 0,7543 |
| 0,6582 | 0,7366 | 0,7551 |
| 0,6603 | 0,7376 |        |

Активная среда  $S_2$ . Условия возбуждения: фотодиссоциация под действием ультрафиолетового излучения или оптическая накачка лазером на красителе

$\lambda_{возд}$ , МКМ

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 0,365  | 1,0920 | 1,099  |
| 1,086  | 1,0923 | 1,100  |
| 1,0915 | 1,0941 | 1,1587 |
| 1,0917 | 1,0946 |        |

Активная среда  $Te_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка аргоновым лазером с длиной волны 476,5 нм

$\lambda_{возд}$ , МКМ

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 0,5571 | 0,5786 | 0,6082 |
| 0,5575 | 0,5787 | 0,6085 |
| 0,5578 | 0,5790 | 0,6087 |
| 0,5579 | 0,5793 | 0,6089 |
| 0,5626 | 0,5794 | 0,6162 |
| 0,5643 | 0,5797 | 0,6165 |
| 0,5647 | 0,5798 | 0,6168 |
| 0,5649 | 0,5841 | 0,6170 |
| 0,5650 | 0,5849 | 0,6204 |
| 0,5696 | 0,5851 | 0,6278 |
| 0,5701 | 0,5857 | 0,6287 |
| 0,5711 | 0,5859 | 0,6288 |
| 0,5714 | 0,5865 | 0,6295 |
| 0,5715 | 0,5869 | 0,6379 |
| 0,5719 | 0,5870 | 0,6381 |
| 0,5720 | 0,5874 | 0,6388 |
| 0,5721 | 0,5924 | 0,6465 |
| 0,5724 | 0,5927 | 0,6473 |
| 0,5766 | 0,5934 | 0,6477 |
| 0,5767 | 0,5936 | 0,6484 |
| 0,5773 | 0,6002 | 0,6561 |
| 0,5780 | 0,6004 | 0,6569 |
| 0,5783 | 0,6005 | 0,6574 |
| 0,5784 | 0,6008 | 0,6581 |
| 0,5785 | 0,6009 |        |

|         |         |         |
|---------|---------|---------|
| 1,30536 | 1,31487 | 1,33636 |
| 1,30620 | 1,3153  | 1,33582 |
| 1,30748 | 1,3192  | 1,33624 |
| 1,30864 | 1,320   | 1,33644 |
| 1,30890 | 1,32916 | 1,338   |
| 1,31095 | 1,33029 | 1,34105 |
| 1,31130 | 1,3310  | 1,33108 |
| 1,31180 | 1,3324  | 1,34136 |
| 1,31205 | 1,3333  | 1,34155 |
| 1,31338 | 1,3349  | 1,34156 |
| 1,31371 | 1,33509 | 1,34211 |
| 1,31462 | 1,33530 | 1,34219 |

Активная среда ClF. Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси Ne, F<sub>2</sub> и Cl<sub>2</sub>

$\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

0,285

Активная среда HF. Условия возбуждения: возбуждение колебательных уровней в химических реакциях; оптическая накачка для возбуждения колебательно-вращательных переходов

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

| Полоса 1—0 | Полоса 2—1 |            |
|------------|------------|------------|
| 2,41       | 2,6668     | 3,0052     |
| 2,43       | 2,6963     | 3,8482     |
| 2,45       | 2,7275     | 3,0935     |
| 2,48       | 2,7604     | 3,1411     |
| 2,551      | 2,7952     | 3,1912     |
| 2,579      | 2,8319     | 3,2438     |
| 2,6084     | 2,8705     | 3,2991     |
| 2,6396     | 2,9111     | Полоса 4—3 |
| 2,6729     | 2,9539     | 2,9221     |
| 2,7075238  | 2,9989     | 2,9549     |
| 2,7440     | 3,0461     | 2,9896     |
| 2,7826     | 3,0958     | 3,026      |
| 2,8231     | 3,1480     | 3,065      |
| 2,8657     | 3,2029     | 3,1454     |
| 2,9103     | 3,2603     | 3,1492     |
| 2,9573     | 3,2206     | Полоса 5—4 |
| 3,0064     | Полоса 3—2 | 3,0982     |
| 3,0582     | 2,7902     | 3,1350     |
| 3,1125     | 2,8213     | 3,1640     |
| 3,1695     | 2,8542     | 3,2151     |
| 3,2292     | 2,8890     | 3,258      |
| 3,2919     | 2,9257     | 3,3044     |
|            | 2,9644     | Полоса 6—5 |
|            |            | 3,333      |
|            |            | 3,377      |

Чисто вращательные переходы

| $v = 0$ | $v = 1$ | $v = 2$ |
|---------|---------|---------|
| 10,1978 | 12,2619 | 10,5819 |
| 10,4578 | 12,7006 | 10,8117 |
| 10,7439 | 13,1877 | 13,2211 |
| 11,0573 | 13,7277 | 14,2881 |
| 11,4033 | 15,0163 | 20,9393 |
| 11,7854 | 18,8010 | 19,55   |
| 12,2082 | 20,1337 | $v = 3$ |
| 12,6781 | 21,6986 | 11,5408 |
| 13,2009 | 36,5    | 19,1129 |
| 13,7841 | 42,4    | 20,3513 |
| 14,4406 | 50,8    | 21,7885 |
| 15,1744 | 63,4    | $v = 4$ |
| 16,0215 | 84,4    | 19,915  |
| 18,09   | 126,5   |         |
| 19,35   |         |         |
| 20,835  |         |         |

Активная среда DF. Условия возбуждения: колебательные уровни в DF возбуждаются при химических реакциях, иницируемых электрическим разрядом, фотолизом или чисто химическим путем

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

| Полоса 3—1 | Полоса 2—1 |                    |
|------------|------------|--------------------|
| 1,836      | 3,6363     | 3,8903             |
| 1,844      | 3,6665     | 3,9272             |
| 1,857      | 3,6923     | 3,9654             |
|            | 3,7310     | 4,0054             |
| Полоса 1—0 | 3,7651     | 4,0464             |
| 3,493      | 3,8007     | 4,0895             |
| 3,521      | 3,8375     | 4,1337             |
| 3,550      | 3,8757     | 4,1789             |
| 3,581      | 3,9155     | Полоса 4—3         |
| 3,612      | 3,9565     | 3,8503             |
| 3,645      | 3,9995     | 3,8817             |
| 3,679      | 4,0435     | 3,9145             |
| 3,716      | 4,0893     | 3,9487             |
| 3,752      | 4,1369     | 3,9843             |
| 3,7901     | 4,1862     | 4,0212             |
| 3,8298     |            | 4,0595             |
| 3,8707     | Полоса 3—2 | Полоса 4—3         |
| 3,9133     | 3,7563     | H <sup>35</sup> Cl |
| 3,9572     | 3,7878     | 4,0054             |
| 4,0032     | 3,8206     | 4,0399             |
| 4,0502     | 3,8547     | 4,0759             |
|            |            | 4,1135             |

Чисто вращательные переходы

| $v = 0$            |         |         |
|--------------------|---------|---------|
| H <sup>35</sup> Cl |         |         |
| 13,8720            | 17,4923 | 22,8637 |
| 14,0994            | 17,9874 | 23,8485 |
| 14,3434            | 18,522  | 24,9367 |
| 16,2125            | 20,4106 | 26,1462 |
| 16,6085            | 21,1556 | 27,508  |
| 17,0340            | 21,9706 |         |

Активная среда HCl. Условия возбуждения: возбуждение при химических реакциях в смеси H<sub>2</sub> и Cl<sub>2</sub>O или Cl<sub>2</sub> и HI, иницируемых электрическим разрядом или фотолизом; вращательные линии возбуждаются при импульсном разряде в смесях Cl<sub>2</sub> и CH<sub>3</sub>Cl, Cl<sub>2</sub> и CH<sub>3</sub>Br или Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и CClF<sub>3</sub>

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

| Полоса 1—0         |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| H <sup>35</sup> Cl | 3,7383             | 3,9909             |
| 3,5728             | 3,7710             | 4,0295             |
| 3,6026             | 3,8050             | H <sup>37</sup> Cl |
| 3,6337             | 3,8401             | 3,8536             |
| 3,6660             | 3,8768             | 3,8864             |
| 3,6996             | 3,9149             | 3,9205             |
| 3,7341             | H <sup>37</sup> Cl | 3,9560             |
| 3,7707             | 3,7098             | H <sup>37</sup> Cl |
| 3,8081             | 3,7408             | 16,664             |
|                    | 3,7735             | 17,997             |
| H <sup>37</sup> Cl | 3,8074             | 19,122             |
| 3,6362             | 3,8425             |                    |
| 3,6685             | Полоса 3—2         | $v = 1$            |
| 3,7021             | H <sup>35</sup> Cl | H <sup>35</sup> Cl |
| 3,7370             | 3,8509             | 17,125             |
| Полоса 2—1         | 3,8840             | 17,575             |
| H <sup>35</sup> Cl | 3,9181             | 18,035             |
| 3,7071             | 3,9536             | 18,555             |
|                    |                    | 19,7002            |

|         |                          |         |
|---------|--------------------------|---------|
| 20,3455 | $\text{H}^{37}\text{Cl}$ | 20,9991 |
| 21,0470 | 16,765                   | 24,3178 |
| 21,8127 | 18,593                   |         |
| 22,6514 | 19,145                   | $v = 3$ |
| 23,5705 | 24,6177                  |         |
| 24,5833 | $v = 2$                  | 19,783  |
| 25,7040 | $\text{H}^{35}\text{Cl}$ | 19,821  |
|         | 19,183                   |         |

## Чисто вращательные переходы

|         |         |          |
|---------|---------|----------|
| $v = 0$ | $v = 1$ | 22,855   |
| 19,399  | 19,988  | 31,368   |
| 20,360  | 21,546  | 32,799   |
| 20,896  | 30,445  | 40,526   |
| 20,949  | 31,849  |          |
| 21,501  | 33,409  | $v = -3$ |
| 22,136  | $v = 2$ | 23,436   |
| 30,948  | 22,226  | 29,786   |
| 32,469  |         |          |

Активная среда DCl. Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции  $\text{D}_2 + \text{Cl}_2$ , инициируемой электрическим разрядом;  $P_{\text{D}_2} = 200$  Па,  $P_{\text{Cl}_2} = 300$  Па

Активная среда DBr. Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции  $\text{D}_2 + \text{Br}_2$ , инициируемой импульсным разрядом;  $P_{\text{D}_2} = 80$  Па,  $P_{\text{Br}_2} = 40$  Па

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{МКМ}$ |                          |                          |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Полоса 2—1                         | 5,1811                   | 5,3562                   |
|                                    | 5,2118                   | 5,3889                   |
| $\text{D}^{35}\text{Cl}$           | 5,2435                   | 5,4577                   |
| 5,0445                             | 5,2760                   | 5,4935                   |
| 5,0743                             | 5,3097                   | 5,5304                   |
| 5,1049                             | 5,3443                   | $\text{D}^{37}\text{Cl}$ |
| 5,1363                             | 5,3799                   | 5,3629                   |
| 5,1688                             | $\text{D}^{37}\text{Cl}$ | 5,3956                   |
| $\text{D}^{37}\text{Cl}$           | 5,1879                   | 5,4295                   |
| 5,0514                             | 5,2186                   |                          |
| 5,0811                             | 5,2503                   | Полоса 5—4               |
| 5,1118                             | 5,2829                   |                          |
| 5,1431                             |                          | $\text{D}^{35}\text{Cl}$ |
| Полоса 3—2                         | Полоса 4—3               | 5,5084                   |
| $\text{D}^{35}\text{Cl}$           | $\text{D}^{35}\text{Cl}$ | 5,5423                   |
| 5,1511                             | 5,3244                   | 5,5776                   |
|                                    |                          | 5,6137                   |

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{МКМ}$ |                          |                          |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Полоса 3—2                         | Полоса 4—3               | 6,1216                   |
| $\text{D}^{79}\text{Br}$           | $\text{D}^{79}\text{Br}$ | 6,1562                   |
| 5,8049                             | 6,0209                   | 6,1918                   |
| 5,8620                             | 6,0529                   | 6,2289                   |
| 5,8928                             | 6,0858                   | Полоса 5—4               |
| 5,9246                             | 6,1200                   | $\text{D}^{79}\text{Br}$ |
| 5,9573                             | 6,1546                   | 6,2566                   |
| $\text{D}^{81}\text{Br}$           | 6,1903                   | 6,2916                   |
| 5,8629                             | 6,2272                   | 6,3279                   |
| 5,8944                             | $\text{D}^{81}\text{Br}$ | $\text{D}^{81}\text{Br}$ |
| 5,9261                             | 6,0225                   | 6,2237                   |
| 5,9590                             | 6,0544                   | 6,2581                   |
|                                    | 6,0873                   | 6,2932                   |
|                                    |                          | 6,3294                   |

Активная среда HBr. Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции  $\text{H}_2 + \text{Br}_2$ , инициируемой импульсным разрядом;  $P_{\text{H}_2} = 200$  Па и  $P_{\text{Br}_2} = 300$  Па

Активная среда NO. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси NOCl (470 Па) и He (780 Па), а также фотодиссоциация NOCl или NO в смеси с  $\text{NO}_2$

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{МКМ}$ |                          |                          |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Полоса 1—0                         | 4,2295                   | $\text{H}^{81}\text{Br}$ |
|                                    | 4,2633                   | 4,3255                   |
| $\text{H}^{79}\text{Br}$           | 4,2988                   | 4,3585                   |
| 4,0170                             | 4,3354                   | 4,3931                   |
| 4,0470                             | $\text{H}^{81}\text{Br}$ | 4,4307                   |
| 4,0783                             | 4,1658                   | 4,4658                   |
| 4,1107                             | 4,1975                   | 4,5047                   |
| 4,1442                             | 4,2639                   | Полоса 4—3               |
| $\text{H}^{81}\text{Br}$           | 4,2994                   |                          |
| 4,0176                             | 4,3359                   | $\text{H}^{79}\text{Br}$ |
| 4,0475                             |                          | 4,5330                   |
| 4,0788                             | Полоса 3—2               | 4,5691                   |
| 4,1112                             | $\text{H}^{79}\text{Br}$ | 4,6070                   |
| 4,1448                             |                          | 4,4663                   |
| 4,1796                             | 4,3250                   | $\text{H}^{81}\text{Br}$ |
| Полоса 2—1                         | 4,3579                   | 4,5335                   |
| $\text{H}^{79}\text{Br}$           | 4,3925                   | 4,5696                   |
| 4,1653                             | 4,4281                   | 4,6076                   |
| 4,1970                             | 4,4652                   | 4,6467                   |
|                                    | 4,5041                   |                          |

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{МКМ}$ |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|
| 1,2237                             | 6,0267 | 6,2110 |
| 1,1069                             | 6,0324 | 6,2191 |
| 2,6072                             | 6,0386 | 6,2249 |
| 2,6380                             | 6,0402 | 6,2328 |
| 5,8462                             | 6,0419 | 6,2381 |
| 5,8549                             | 6,0543 | 6,2511 |
| 5,8584                             | 6,0628 | 6,2602 |
| 5,8706                             | 6,0673 | 6,2645 |
| 5,8789                             | 6,0801 | 6,2778 |
| 5,9036                             | 6,0884 | 6,2865 |
| 5,9083                             | 6,0934 | 6,2913 |
| 5,9423                             | 6,1015 | 6,2998 |
| 5,9546                             | 6,1204 | 6,3051 |
| 5,9550                             | 6,1417 | 6,3136 |
| 5,9632                             | 6,1538 | 6,3191 |
| 5,9673                             | 6,1546 | 6,3274 |
| 5,9756                             | 6,1576 | 6,3336 |
| 5,9799                             | 6,1663 | 6,3764 |
| 5,9882                             | 6,1792 | 6,3894 |
| 5,9931                             | 6,1838 | 6,3980 |
| 6,0010                             | 6,1921 | 6,4031 |
| 6,0054                             | 6,1972 | 6,4262 |
| 6,0192                             | 6,2055 | 6,4321 |

Продолжение табл. 34.2

Активная среда CN. Условия возбуждения: возбуждение электрических и колебательных переходов при фотодиссоциации, а также при электрическом разряде в парах HCN

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$ |         |         |
|------------------------------------|---------|---------|
| 1,09966                            | 1,10485 | 1,41911 |
| 1,09963                            | 1,10445 | 1,41954 |
| 1,09965                            | 1,10521 | 1,42005 |
| 1,09974                            | 1,10603 | 1,42065 |
| 1,09987                            | 1,10689 | 1,42132 |
| 1,10007                            | 1,10726 | 1,42207 |
| 1,10031                            | 1,10782 | 1,42289 |
| 1,10061                            | 1,1879  | 1,42380 |
| 1,10096                            | 1,10981 | 1,42478 |
| 1,10136                            | 1,11090 | 1,42583 |
| 1,10082                            | 1,11200 | 1,42696 |
| 1,10232                            | 1,11321 | 1,42808 |
| 1,10288                            | 1,41830 | 1,42945 |
| 1,10348                            | 1,41849 | 1,42081 |
| 1,10414                            | 1,41876 |         |

Активная среда OH. Условия возбуждения: фотолит в смеси  $\text{O}_3$  и  $\text{H}_2$ ; импульсный разряд в смеси  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2$  и He; вращательные переходы при импульсном разряде в смеси  $\text{SF}_6$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$ |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|
| 2,93432                            | 14,640 | 14,655 |
| 2,96999                            | 14,646 | 14,669 |
| 3,07877                            | 14,662 | 15,256 |
| 3,11677                            | 15,289 | 15,274 |
| 3,15697                            | 15,294 | 18,455 |
| 3,32615                            | 15,313 | 18,492 |
| 3,27653                            | 18,788 | 18,502 |
| $v=0$                              | 18,828 | 18,532 |
| 12,273                             | 18,849 | 19,555 |
| 12,279                             | 18,878 | 19,594 |
| 12,660                             | 20,05  | 19,619 |
| 12,663                             | 21,48  | 19,650 |
| 13,073                             | 21,57  | 20,87  |
| 13,079                             | 23,14  | 20,93  |
| 13,088                             | 23,26  | 22,33  |
| 13,525                             | 25,11  | 22,45  |
| 13,538                             | 25,28  | 24,07  |
| 13,547                             | 27,47  | 24,18  |
| 13,557                             | 27,71  | 26,12  |
| 14,043                             | $v=1$  | 26,30  |
| 14,059                             | 13,632 |        |
| 14,067                             | 13,642 | $v=2$  |
| 14,081                             | 14,118 | 19,273 |
| 14,620                             | 14,129 | 19,321 |

Активная среда OD. Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси  $\text{SF}_6$ ,  $\text{D}_2$  и  $\text{O}_2$

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$ |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|
| $v=0$                              | 19,102 | 19,696 |
| 18,121                             | 19,121 | 19,704 |
| 18,138                             | 19,141 | 20,271 |
| 18,590                             | 19,161 | 20,228 |
| 18,603                             | 19,662 | 20,296 |
| 18,624                             | 19,681 | 30,313 |

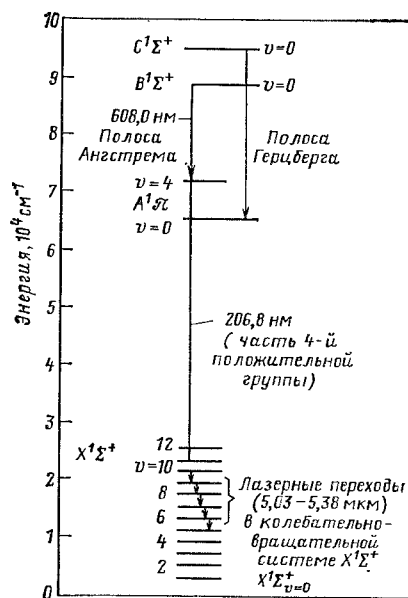


Рис. 34.8. Схема части лазерных переходов на молекулах CO, показывающая электронные переходы в полосе Ангстрема и колебательно-вращательные переходы в основном состоянии молекулы  $\text{CO } X^1\Sigma^+$  [7]

Продолжение табл. 34.2

Активная среда CO (рис. 34.8). Условия возбуждения: возбуждение электронных состояний в импульсном разряде при высокой плотности тока; типичное давление для ультрафиолетовых линий 8 кПа, для линий видимого диапазона — 90—250 Па; возбуждение вращательные колебательных переходов в импульсном или непрерывном разряде в смеси CO и  $\text{N}_2$  (иногда с He, Xe, Hg), при газодинамическом расширении, в поперечном электрическом разряде, а также в химических реакциях

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{мкм}$ |          |          |
|------------------------------------|----------|----------|
| 0,181085                           | 0,483091 | 0,519825 |
| 0,187831                           | 0,483202 | 0,519888 |
| 0,189784                           | 0,483297 | 0,519952 |
| 0,195006                           | 0,483602 | 0,558566 |
| 0,197013                           | 0,483638 | 0,558903 |
| 0,450374                           | 0,483658 | 0,559213 |
| 0,450508                           | 0,518103 | 0,559498 |
| 0,450627                           | 0,518355 | 0,559757 |
| 0,450728                           | 0,518586 | 0,560198 |
| 0,450816                           | 0,518793 | 0,560380 |
| 0,450888                           | 0,518987 | 0,560536 |
| 0,450947                           | 0,519145 | 0,560665 |
| 0,482082                           | 0,519298 | 0,560769 |
| 0,482290                           | 0,519426 | 0,560849 |
| 0,482483                           | 0,519508 | 0,560856 |
| 0,482659                           | 0,519531 | 0,560967 |
| 0,482820                           | 0,519617 | 0,561054 |
| 0,482964                           | 0,519633 | 0,561114 |
|                                    | 0,519740 | 0,561149 |

|          |            |            |            |             |              |
|----------|------------|------------|------------|-------------|--------------|
| 0,604536 | 2,9725     | 5,132949   | 5,109734   | 5,292846    | 5,345838     |
| 0,604983 | 2,9757     | 5,145754   | 5,120577   | 5,304651    | 5,356924     |
| 0,605400 | 2,9789     |            | 5,131555   | 5,316600    | 5,368153     |
| 0,605787 | 3,0174     | Полоса 4—3 | 5,142663   | 5,328694    | 5,379526     |
| 0,606464 | 3,9206     | 4,880759   | 5,153909   | 5,340935    | 5,391045     |
| 0,606756 | 3,0668     | 4,890016   | 5,165289   | 5,353322    | 5,402707     |
| 0,607016 |            | 4,899391   | 5,176806   | 5,365859    | 5,414516     |
| 0,607243 | Полоса 1—0 | 4,908883   | 5,188460   | 5,378545    | 5,426477     |
| 0,607438 | 4,735872   | 4,918494   | 5,200254   | 5,391382    | 5,438584     |
| 0,607604 | 4,745130   | 4,928238   | 5,21187    | 5,404372    | 5,450840     |
| 0,607734 | 4,754501   | 4,938978   | 5,224262   | 5,417516    | 5,463249     |
| 0,607752 | 4,763984   | 4,948052   | 5,236479   | 5,430815    | 5,475810     |
| 0,607831 | 4,773582   | 4,958148   | 5,248840   | 5,444270    | 5,488524     |
| 0,607899 | 4,783295   | 4,968369   | 5,261343   | 5,457884    | 5,501394     |
| 0,608018 | 4,793123   | 4,978711   | 5,273997   | 5,471632    | 5,514421     |
| 0,608102 | 4,803067   | 4,989181   | 5,286796   | 5,485591    | 5,527606     |
| 0,608155 | 4,813129   | 4,999775   | 5,299744   | 5,499688    | 5,540950     |
| 0,608175 | 4,823310   | 5,010497   | 5,312842   |             | 5,554455     |
| 0,658285 | 4,833609   | 5,021347   | 5,326091   | Полоса 9—8  | 5,568122     |
| 0,658805 | 4,844029   | 5,032321   | 5,339493   | 5,108900    | Полоса 11—10 |
| 0,659287 | 4,854569   | 5,043435   | 5,353049   | 5,100430    | 5,122753     |
| 0,659729 | 4,865231   | 5,054676   |            | 5,092002    | 5,129726     |
| 0,660130 | 4,876016   | 5,066048   | Полоса 7—6 | 5,201370    | 5,136819     |
| 0,660438 |            | 5,077554   | 5,074432   | 5,211315    | 5,144032     |
| 0,660813 | Полоса 2—1 |            | 5,084106   | 5,221392    | 5,151366     |
| 0,661093 | 4,767821   | Полоса 5—4 | 5,094028   | 5,231603    | 5,158822     |
| 0,661154 | 4,776892   | 4,943828   | 5,104017   | 5,241946    | 5,166400     |
| 0,661427 | 4,786076   | 4,953240   | 5,114134   | 5,252424    | 5,174100     |
| 0,661334 | 4,795373   | 4,962772   | 5,124408   | 5,263039    | 5,181924     |
| 0,661426 | 4,804785   | 4,972425   | 5,134757   | 5,273789    | 5,189871     |
| 0,661536 | 4,814312   | 4,982220   | 5,145264   | 5,284678    | 5,196501     |
| 0,661695 | 4,823954   | 4,992099   | 5,155902   | 5,295704    | 5,204601     |
| 0,661817 | 4,833714   | 5,002121   | 5,166672   | 5,306870    | 5,212701     |
| 0,662102 | 4,843591   | 5,012268   | 5,177575   | 5,318176    | 5,220801     |
| 0,662186 | 4,853586   | 5,022539   | 5,188617   | 5,329624    | 5,228901     |
| 0,662216 | 4,863700   | 5,032938   | 5,199792   | 5,341216    | 5,237001     |
| 2,3474   | 4,873935   | 0,043462   | 5,211102   | 5,352955    | 5,245101     |
| 2,3769   | 4,884291   | 5,054117   | 5,222555   | 5,364837    | 5,253201     |
| 2,4380   | 4,894769   | 5,064899   | 5,234145   | 5,376865    | 5,261301     |
| 2,4344   | 4,905369   | 5,075812   | 5,245874   | 5,389039    | 5,269401     |
| 2,4696   | 4,916094   | 5,086856   | 5,257745   | 5,401364    | 5,277501     |
| 2,5019   | 4,926943   | 5,098033   | 5,269759   | 5,413837    | 5,285601     |
| 2,5350   |            | 5,109343   | 5,281916   | 5,426463    | 5,293701     |
| 2,5689   | Полоса 3—2 | 5,120787   | 5,294218   | 5,439219    | 5,301801     |
| 2,6036   | 4,846781   | 5,131252   | 5,306666   | 5,452172    | 5,309901     |
| 2,6392   | 4,856233   | 5,144084   | 5,319261   | 5,465259    | 5,318001     |
| 2,6756   | 4,865803   | 5,155938   | 5,332005   | 5,478502    | 5,326101     |
| 2,6886   | 4,875490   | 5,167931   | 5,344899   | 5,491904    | 5,334201     |
| 2,6914   | 4,885296   | 5,180064   | 5,357945   | 5,505464    | 5,342301     |
| 2,7129   | 4,895221   | 5,192338   | 5,371143   | 5,519186    | 5,350401     |
| 2,7262   | 4,905267   | 5,204755   | 5,384494   | 5,533070    | 5,358501     |
| 2,7290   | 4,915434   | 5,217312   | 5,398001   | 5,547118    | 5,366601     |
| 2,7319   | 4,925723   | 5,230020   | 5,411665   | 5,561330    | 5,374701     |
| 2,7511   | 4,936136   | 5,242872   |            | 5,575710    | 5,382801     |
| 2,7647   | 4,946672   | 5,255870   | Полоса 8—7 | Полоса 10—9 | 5,390901     |
| 2,7676   | 4,957333   | 5,269018   | 5,142062   | 5,096828    | 5,399001     |
| 2,7705   | 4,968120   | 5,282316   | 5,151996   | 5,104413    | 5,407101     |
| 2,7903   | 4,979035   |            | 5,162000   | 5,112118    | 5,415201     |
| 2,8042   | 4,990016   | Полоса 6—5 | 5,172164   | 5,119944    | 5,423301     |
| 2,8071   | 5,001277   | 5,008369   | 5,182459   | 5,127892    | 5,431401     |
| 2,8101   | 5,012578   | 5,017940   | 5,192888   | 5,135961    | 5,439501     |
| 2,8306   | 5,023976   | 5,027635   | 5,203447   | 5,144032    | 5,447601     |
| 2,8446   | 5,035544   | 5,037454   | 5,214142   | 5,152103    | 5,455701     |
| 2,8476   | 5,047242   | 5,047397   | 5,224972   | 5,160174    | 5,463801     |
| 2,8507   | 5,059073   | 5,057467   | 5,235937   | 5,168245    | 5,471901     |
| 2,8892   | 5,071040   | 5,067663   | 5,247038   | 5,176316    | 5,480001     |
| 2,8923   | 5,083144   | 5,077988   | 5,258279   | 5,184387    | 5,488101     |
| 2,9288   | 5,095386   | 5,088440   | 5,269659   | 5,192458    | 5,496201     |
| 2,9319   | 5,107766   | 5,099023   | 5,281183   | 5,200529    | 5,504301     |
| 2,9351   | 5,120267   |            |            | 5,208600    | 5,512401     |

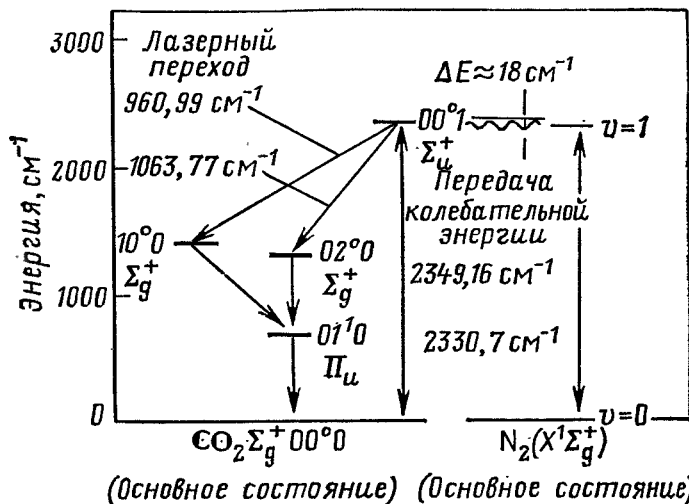
|              |              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 5,429350     | 5,410177     | 5,757944     | 6,206969     | 6,558117     | Полоса 32—31 |
| 5,439978     | 5,418642     | 5,769382     | 6,221841     | 6,572552     | 7,441563     |
| 5,450750     | 5,427242     | 5,781150     | Полоса 20—19 | 6,587194     | 7,457822     |
| 5,461666     | 5,435978     | 5,793071     | 6,097625     | 6,602046     | 7,474357     |
| 5,472735     | 5,444850     | 5,817413     | 6,109989     | 6,617109     | 7,491175     |
| 5,483932     | 5,458370     | 5,829830     | 6,122525     | 6,632387     | 7,508252     |
| 5,495289     | 5,464893     | 5,842415     | 6,135248     | 6,647880     | 7,525593     |
| 5,506793     | 5,460608     | 5,855168     | 6,148152     | 6,663590     | 7,543207     |
| 5,518447     | 5,4617391    | 5,868096     | 6,161240     | Полоса 25—24 | Полоса 33—32 |
| 5,530252     | 5,4628872    | 5,881189     | 6,174509     | 6,607691     | 7,593623     |
| 5,542208     | 5,4640505    | 5,894455     | 6,187966     | 6,621596     | 7,610553     |
| 5,564315     | 5,4652298    | 5,907895     | 6,201608     | 6,635713     | 7,627777     |
| 5,566589     | 5,4664243    | 5,921510     | 6,215438     | 6,650037     | 7,645277     |
| 5,579010     | 5,4676348    | 5,935301     | 6,229461     | 6,664574     | 7,663057     |
| 5,591588     | 5,4688612    | 5,949271     | 6,243673     | 6,679326     | 7,681105     |
| 5,604325     | 5,4701037    | 5,963420     | 6,258077     | 6,694287     | 7,734191     |
| 5,617221     | 5,4713623    | 5,977751     | 6,272677     | 6,709469     | 7,751571     |
| 5,630278     | 5,4726379    | 5,992264     | 6,287472     | Полоса 26—25 | Полоса 34—33 |
| 5,643498     | 5,4739293    | 6,006963     | 6,302466     | 6,702067     | 7,769230     |
| 5,656881     | 5,4752373    | Полоса 17—16 | Полоса 21—20 | 6,716066     | 7,787173     |
| 5,670430     | 5,4765620    | 5,842407     | 6,191453     | 6,730277     | 7,805408     |
| 5,684145     | 5,4779036    | 5,854229     | 6,204067     | 6,744698     | 7,823924     |
| 5,698029     | 5,4792622    | 5,866221     | 6,216856     | 6,759342     | Полоса 35—34 |
| 5,712083     | 5,4806380    | 5,878384     | 6,229843     | 6,774209     | 7,879916     |
| Полоса 13—12 | 5,4820310    | 5,890704     | 6,243012     | 6,789276     | 7,897740     |
| 5,343257     | 5,4834415    | 5,903202     | 6,256366     | 6,804577     | 7,915858     |
| 5,351719     | 5,4848696    | 5,915865     | 6,269915     | 6,820100     | 7,934266     |
| 5,360314     | 5,4863154    | 5,928701     | 6,283649     | 6,835854     | 7,952969     |
| 5,369042     | Полоса 15—14 | 5,941711     | 6,297578     | Полоса 27—26 | 8,031109     |
| 5,377903     | 5,374479     | 5,954841     | 6,311705     | 6,842243     | 8,049391     |
| 5,386899     | 5,381078     | 5,968257     | 6,326023     | 6,854639     | 8,067991     |
| 5,396031     | 5,387807     | 5,981799     | 6,340538     | 6,871970     | 8,086665     |
| 5,405298     | 5,394666     | 5,995510     | 6,355252     | 6,887152     | 8,106093     |
| 5,414703     | 5,401656     | 6,009406     | 6,370176     | 6,902569     | 8,206919     |
| 5,424245     | 5,408780     | 6,023483     | 6,385283     | 6,918218     | 8,226011     |
| 5,433926     | 5,416030     | 6,037744     | Полоса 22—21 | 6,934101     | 8,245417     |
| 5,43926      | 5,423415     | 6,052189     | 6,300749     | Полоса 28—27 | 8,265146     |
| 5,4516474    | 5,430932     | Полоса 18—17 | 6,313813     | 6,942824     | 13C16O       |
| 5,4527444    | 5,438584     | 5,941314     | 6,327064     | 6,957669     | Полоса 7—6   |
| 5,4505651    | 5,446369     | 5,953562     | 6,340507     | 6,972747     | 5,303284     |
| 5,4538558    | 5,454289     | 5,965936     | 6,354144     | 6,988057     | 5,314516     |
| 5,4549827    | 5,462344     | 5,978508     | 6,367975     | 7,003596     | 5,325877     |
| 5,461252     | 5,470535     | 5,991256     | 6,382004     | 7,019371     | 5,337376     |
| 5,472816     | 5,478687     | 6,004170     | 6,410658     | 7,035382     | Полоса 8—7   |
| 5,484536     | 5,488230     | 6,017267     | 6,425284     | Полоса 29—28 | 5,328437     |
| 5,495412     | 5,499930     | 6,030541     | 6,440113     | 7,076735     | 5,339330     |
| 5,508443     | 5,5121786    | 6,043400     | 6,455148     | 7,092158     | 5,350355     |
| 5,516474     | 5,523804     | 6,05760      | 6,470388     | 7,107821     | 5,367272     |
| 5,527444     | 5,533222     | 6,07142      | 6,485838     | 7,123720     | 5,372811     |
| 5,505651     | 5,540827     | 6,08542      | Полоса 23—22 | 7,139864     | 5,384241     |
| 5,538558     | 5,5483496    | 6,09960      | 6,400168     | 7,156250     | 5,395810     |
| 5,549827     | 5,5576340    | 6,11397      | 6,413510     | Полоса 30—29 | 5,407516     |
| 5,561252     | 5,5689343    | 6,12852      | 6,427033     | 7,199637     | Полоса 9—8   |
| 5,572816     | 5,5822516    | 6,14327      | 6,440760     | 7,215418     | 5,377032     |
| 5,584536     | 5,5835859    | Полоса 19—18 | 6,454686     | 7,231448     | 5,387850     |
| 5,595412     | 5,583870     | 6,030715     | 6,468812     | 7,247721     | 5,398801     |
| 5,608443     | 5,594893     | 6,043187     | 6,497679     | 7,264248     | 5,409888     |
| 5,620630     | 5,606068     | 6,055827     | 6,512417     | Полоса 31—30 | 5,421112     |
| 5,632975     | 5,6189374    | 6,068653     | 6,527363     | 7,310709     | 5,4322471    |
| 5,645485     | 5,63063      | 6,081656     | 6,542518     | 7,326587     | 5,4439721    |
| 5,658148     | 5,646926     | 6,094841     | 6,557884     | 7,342742     | 5,4556001    |
| 5,670974     | 5,6580965    | 6,108206     | 6,573463     | 7,359153     | 5,4673911    |
| 5,683961     | 5,6705182    | 6,121753     | Полоса 24—23 | 7,375822     | 5,4793111    |
| 5,697113     | 5,6819579    | 6,135488     | 6,502437     | 7,392748     | 5,4913771    |
| 5,710431     | 5,6934157    | 6,149406     | 6,516055     |              | 5,5035831    |
| 5,723916     | 5,7048917    | 6,163511     | 6,529870     |              |              |
| 5,737568     | Полоса 16—15 | 6,177806     | 6,543890     |              |              |
| 5,751390     | 5,746341     | 6,192291     |              |              |              |
| 5,765384     |              |              |              |              |              |
| 5,779551     |              |              |              |              |              |
| 5,793891     |              |              |              |              |              |
| 5,808408     |              |              |              |              |              |
| 5,823103     |              |              |              |              |              |
| Полоса 14—13 |              |              |              |              |              |
| 5,354648     |              |              |              |              |              |
| 5,362186     |              |              |              |              |              |
| 5,369854     |              |              |              |              |              |
| 5,377654     |              |              |              |              |              |
| 5,385585     |              |              |              |              |              |
| 5,393649     |              |              |              |              |              |
| 5,401846     |              |              |              |              |              |



Полоса 10—9

|           |          |          |
|-----------|----------|----------|
| 5,437800  | 5,733698 | 6,039534 |
| 5,448674  | 5,741227 | 6,052565 |
| 5,459684  | 5,746076 | 6,063494 |
| 5,470881  | 5,752912 | 6,065767 |
| 5,482117  | 5,758611 | 6,075932 |
| 5,493543  | 5,764755 | 6,079138 |
| 5,505110  | 5,771303 | 0,088540 |
| 5,516821  | 5,776747 | 0,092683 |
| 5,528674  | 5,784148 | 6,101318 |
| 5,540673  | 5,788893 | 6,106404 |
| 5,552816  | 5,797155 | 6,114263 |
| 5,560027  | 5,798443 | 6,120296 |
| 5,570954  | 5,801198 | 6,127383 |
| 5,582202  | 5,810042 | 6,139855 |
| 5,593232  | 5,810319 | 6,140673 |
| 5,604580  | 5,813656 | 6,152366 |
| 5,615709  | 5,821796 | 6,154138 |
| 5,626074  | 5,826267 | 6,165049 |
| 5,637715  | 5,833703 | 6,167780 |
| 5,647445  | 5,839055 | 6,177904 |
| 5,6579476 | 5,845769 | 6,181597 |
| 5,6685871 | 5,851981 | 6,190935 |
| 5,6791415 | 5,857987 | 6,195595 |
| 5,6903490 | 5,865079 | 6,204140 |
| 5,7015709 | 5,870367 | 6,209772 |
| 5,7128080 | 5,882903 | 6,217521 |
| 5,7240813 | 5,892408 | 6,230817 |
| 5,7354060 | 5,895604 | 6,231077 |
| 5,7466666 | 5,904387 | 6,233577 |
| 5,7579044 | 5,908465 | 6,244817 |
| 5,7691704 | 5,916519 | 6,256511 |
| 5,7803938 | 5,921487 | 6,258735 |
| 5,7916472 | 5,928814 | 6,289624 |
| 5,8029687 | 5,934676 | 6,272833 |
| 5,8142846 | 5,941269 | 6,282915 |
| 5,8256074 | 5,948030 | 6,287118 |
| 5,8369277 | 5,953887 | 6,296385 |
| 5,8482477 | 5,964829 | 6,301586 |
| 5,8595674 | 5,966669 | 6,310036 |
| 5,8708874 | 5,976868 | 6,323871 |
| 5,8822074 | 5,979617 | 6,337216 |
| 5,8935274 | 5,989075 | 6,349964 |
| 5,9048477 | 5,992728 | 6,350412 |
| 5,9161677 | 6,001439 | 6,352094 |
| 5,9274877 | 6,006059 | 6,363789 |
| 5,9388077 | 6,013970 | 6,366487 |
| 5,9501277 | 6,019459 | 6,377348 |
| 5,9614477 | 6,026667 | 6,381068 |
| 5,9727677 | 6,033077 | 6,391091 |
| 5,9840877 |          | 6,405026 |

## Многоатомные молекулы

Активная среда  $\text{Xe}_2\text{Cl}$  [8]. Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси  $\text{Ag}$ ,  $\text{Xe}$  и  $\text{CCl}_4$ 
 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм  
0,518
Активная среда  $\text{Xe}_2\text{Br}$  [9]. Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси  $\text{Ag}$ ,  $\text{Xe}$  и  $\text{CHBr}_3$ 
 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм  
0,440
Активная среда  $\text{Kr}_2\text{F}$  [9]. Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком  $\text{Ag}$ ,  $\text{Kr}$  и  $\text{NF}_3$ 
 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм  
0,430
Активная среда  $\text{O}_3$ . Условия возбуждения: оптическая накачка  $\text{CO}_2$ -лазером
 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм  
121  
163,61  
171,5
Рис. 34.9. Схема энергетических уровней молекул  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$  [1]. Отсчет энергии ведется от основных состояний  $\text{N}_2(X^1\Sigma_g^+ v=0)$  и  $\text{CO}_2(00^00)$ . Показаны селективное возбуждение уровня  $00^01$  молекулы  $\text{CO}_2$  путем передачи энергии с колебательного уровня  $v=1$  молекулы  $\text{N}_2$  и лазерные переходы между уровнями  $\text{CO}_2$ 

Активная среда  $\text{CO}_2$ . Условия возбуждения: непрерывный разряд в смеси  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{He}$  (рис. 34.9) (соотношение в смеси 1:2,5:10); возбуждение в продольном разряде с прокачкой газовой смеси, в режиме газодинамического лазера (ГДЛ); химический  $\text{CO}_2$ -лазер с резонансной передачей энергии возбуждения от молекул  $\text{HF}$  или  $\text{DF}$ ; импульсное возбуждение в поперечном разряде при высоком давлении (ТЕА); максимальная мощность (10,6 мкм) 250 кВт (в режиме ГДЛ), энергия 1000 Дж (в режиме ТЕА)

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкмМолекула  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ 

Полоса 102—101

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 4,3203 | 4,3612 | 4,3745 |
| 4,3249 | 4,3644 | 4,3779 |
| 4,3276 | 4,3677 | 4,3814 |
| 4,3549 | 4,3711 | 4,3849 |
| 4,3580 |        |        |

Молекула  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ 

Полоса 101—100

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 4,314 | 4,371 | 4,385 |
| 4,340 | 4,377 | 4,392 |
| 4,354 | 4,382 | 4,398 |
| 4,346 |       |       |

Молекула  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$

Полоса 001—020

|           |           |            |
|-----------|-----------|------------|
| 9,0702655 | 9,2605258 | 9,6035727  |
| 9,0757663 | 9,2713577 | 9,6212185  |
| 9,0814571 | 9,2824434 | 9,6391656  |
| 9,0873410 | 9,2937852 | 9,6574156  |
| 9,0934211 | 9,3053853 | 9,6750700  |
| 9,0997003 | 9,3172460 | 9,6948301  |
| 9,1061815 | 9,3293695 | 9,7139973  |
| 9,1128676 | 9,3417579 | 9,7334730  |
| 9,1197615 | 9,3544134 | 9,7532586  |
| 9,1268660 | 9,3673380 | 9,7733552  |
| 9,1341839 | 9,3805340 | 9,7937640  |
| 9,1417179 | 9,3940033 | 9,8144862  |
| 9,1494708 | 9,4147242 | 9,8355229  |
| 9,1574453 | 9,4288857 | 9,8568751  |
| 9,1656440 | 9,4433275 | 9,8785439  |
| 9,1740695 | 9,4580515 | 9,9005300  |
| 9,1827244 | 9,4730598 | 9,9228344  |
| 9,1916114 | 9,4883540 | 9,9454579  |
| 9,2007329 | 9,5039361 | 9,9684012  |
| 9,2100915 | 9,5198079 | 9,9916650  |
| 9,2196895 | 9,5359711 | 10,0152438 |
| 9,2295296 | 9,5524275 | 10,0391561 |
| 9,2396141 | 9,5691788 | 10,0633844 |
| 9,2499453 | 9,5882267 | 10,0879349 |

Полоса 001—100

|            |            |            |
|------------|------------|------------|
| 9,9985568  | 10,2331666 | 10,6531558 |
| 10,0049238 | 10,2466246 | 10,6745861 |
| 10,0115934 | 10,2603814 | 10,6963859 |
| 10,0185643 | 10,2744384 | 10,7185600 |
| 10,0258352 | 10,2887964 | 10,7411135 |
| 10,0334048 | 10,3034581 | 10,7640517 |
| 10,0412720 | 10,3184241 | 10,7873802 |
| 10,0494358 | 10,3336965 | 10,8111046 |
| 10,0578953 | 10,3492772 | 10,8352307 |
| 10,0666497 | 10,3651683 | 10,8597648 |
| 10,0756984 | 10,3813718 | 10,8847131 |
| 10,0850408 | 10,3978901 | 10,9100823 |
| 10,0946764 | 10,4232632 | 10,9358790 |
| 10,1046049 | 10,4405795 | 10,9621103 |
| 10,1148262 | 10,4582196 | 10,9887835 |
| 10,1253400 | 10,4761866 | 11,0159060 |
| 10,1361464 | 10,4944835 | 11,0434858 |
| 10,1472454 | 10,5131136 | 11,0715308 |
| 10,1586374 | 10,5320802 | 11,1000493 |
| 10,1703225 | 10,5513866 | 11,1290499 |
| 10,1823014 | 10,5710372 | 11,1585415 |
| 10,1945745 | 10,5910352 | 11,1885334 |
| 10,2071425 | 10,6113848 | 11,2190349 |
| 10,2200062 | 10,6320902 | 11,2500559 |

Полоса 002—021

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 9,209171 | 9,352366 | 9,589785 |
| 9,217773 | 9,364555 | 9,606753 |
| 9,226615 | 9,377018 | 9,624027 |
| 9,235699 | 9,389757 | 9,641609 |
| 9,245029 | 9,402774 | 9,655900 |
| 9,254607 | 9,450554 | 9,677702 |
| 9,264436 | 9,464848 | 9,696217 |
| 9,274517 | 9,479432 | 9,715046 |
| 9,284854 | 9,494307 | 9,734191 |
| 9,295448 | 9,509476 | 9,753653 |
| 9,306302 | 9,524939 | 9,773433 |
| 9,316821 | 9,540700 | 9,793533 |
| 9,328800 | 9,556760 | 9,813954 |
| 9,340448 | 9,573121 |          |

Полоса 002—101

|           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| 10,146624 | 10,337367 | 10,626664 |
| 10,157295 | 10,355455 | 10,647099 |
| 10,168257 | 10,367847 | 10,667888 |
| 10,179508 | 10,383545 | 10,689036 |
| 10,191050 | 10,399550 | 10,710547 |
| 10,202883 | 10,415866 | 10,732425 |
| 10,215008 | 10,458029 | 10,754676 |
| 10,227424 | 10,475449 | 10,777305 |
| 10,240133 | 10,493192 | 10,800317 |
| 10,253135 | 10,511259 | 10,823718 |
| 10,266431 | 10,529654 | 10,847513 |
| 10,280023 | 10,548380 | 10,871709 |
| 10,293911 | 10,567440 | 10,896312 |
| 10,380097 | 10,586838 | 10,921327 |
| 10,322582 | 10,606578 |           |

Полоса 003—102

|           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| 10,288987 | 10,420594 | 10,706519 |
| 10,302426 | 10,53097  | 10,727749 |
| 10,316157 | 10,54916  | 10,749339 |
| 10,330184 | 10,56762  | 10,771295 |
| 10,344505 | 10,58646  | 10,793621 |
| 10,359124 | 10,60562  | 10,816324 |
| 10,374040 | 10,665124 | 10,839408 |
| 10,389256 | 10,685646 | 10,862879 |
| 10,404773 |           |           |

Полоса 004—103

|          |          |
|----------|----------|
| 10,55376 | 10,5900  |
| 10,57170 | 10,60858 |

Полоса 001—110

|           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| 10,591025 | 10,930707 | 11,007301 |
| 10,789077 | 10,942351 | 11,015934 |
| 10,890194 | 10,951486 | 11,029744 |
| 10,900964 | 10,972615 | 11,083630 |
| 10,921469 | 10,985266 |           |

Полоса 011—110

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 10,50816 | 10,61421 | 11,06069 |
| 10,51001 | 10,92146 | 11,07582 |
| 10,52029 | 10,93070 | 11,08363 |
| 10,52277 | 10,94235 | 11,09947 |
| 10,53273 | 10,95148 | 11,10693 |
| 10,54550 | 10,96361 | 11,12354 |
| 10,54919 | 10,97261 | 11,13062 |
| 10,55859 | 10,98526 | 11,14803 |
| 10,56284 | 10,99409 | 11,15468 |
| 10,57201 | 11,00730 | 11,17295 |
| 10,57678 | 11,01593 | 11,17914 |
| 10,58575 | 11,02974 | 11,19830 |
| 10,59982 | 11,03813 | 11,20398 |
| 10,60556 | 11,05258 | 11,22408 |

Полоса 011—030

|         |         |         |
|---------|---------|---------|
| 10,9735 | 11,1000 | 11,1980 |
| 10,9950 | 11,1070 | 11,2035 |
| 11,0165 | 11,1235 | 11,2235 |
| 11,0300 | 11,1315 | 11,2295 |
| 11,0385 | 11,1485 | 11,2495 |
| 11,0535 | 11,1555 | 11,2545 |
| 11,0610 | 11,1736 | 11,2770 |
| 11,0760 | 11,1790 | 11,2805 |
| 11,0850 |         |         |

## Полоса 012—111

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 10,53907 | 10,5639  | 10,60362 |
| 10,54173 | 10,58112 | 10,60885 |
| 10,55455 |          |          |

## Полоса 101—200

10,51027  
10,54271

## Полоса?

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 13,144 | 14,16  | 17,029 |
| 13,154 | 14,19  | 17,036 |
| 13,159 | 14,21  | 17,048 |
| 13,541 | 16,586 | 17,370 |
| 13,87  | 16,597 | 17,376 |
| 14,1   | 17,023 | 17,390 |

Молекула  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ 

## Полоса 001—020

|            |            |            |
|------------|------------|------------|
| 8,98770094 | 9,15508653 | 9,39730489 |
| 8,99496997 | 9,16569469 | 9,41181219 |
| 9,00240216 | 9,17649187 | 9,42653076 |
| 9,00999899 | 9,18747931 | 9,44146159 |
| 9,01776190 | 9,19865824 | 9,45660568 |
| 9,02569233 | 9,21002991 | 9,47196399 |
| 9,03379171 | 9,22159552 | 9,48753750 |
| 9,04206146 | 9,23931022 | 9,50332713 |
| 9,05050297 | 9,25136594 | 9,51933381 |
| 9,05911764 | 9,26361978 | 9,53555845 |
| 9,06790685 | 9,27607290 | 9,55200192 |
| 9,07687197 | 9,22872646 | 9,56866511 |
| 9,08601437 | 9,30158160 | 9,58554884 |
| 9,09533538 | 9,31463943 | 9,60265396 |
| 9,10483634 | 9,32790109 | 9,61998126 |
| 9,11451859 | 9,34136768 | 9,63753153 |
| 9,12438343 | 9,35504028 |            |
| 9,13443217 | 9,36891998 |            |
| 9,14466611 | 9,38300783 |            |

## Полоса 001—100

|             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|
| 10,10434660 | 10,23981204 | 10,50639411 |
| 10,11295490 | 10,25237519 | 10,52476294 |
| 10,12186285 | 10,26525095 | 10,54349163 |
| 10,13107088 | 10,27844106 | 10,56258410 |
| 10,14057947 | 10,29194733 | 10,58204439 |
| 10,15038920 | 10,30577171 | 10,60187671 |
| 10,16050076 | 10,38758981 | 10,62208541 |
| 10,17091494 | 10,40353724 | 10,64267502 |
| 10,18163264 | 10,41982107 | 10,66365020 |
| 10,19265484 | 10,43644425 | 10,68501579 |
| 10,20398263 | 10,45340986 | 10,70677681 |
| 10,21561722 | 10,47072112 | 10,72893842 |
| 10,22755988 | 10,48838137 |             |

Молекула  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ 

## Полоса 001—020

|            |            |             |
|------------|------------|-------------|
| 9,59239947 | 9,73558466 | 9,97528536  |
| 9,60168999 | 9,74869533 | 9,99353402  |
| 9,61125719 | 9,76211913 | 10,01213398 |
| 9,62110404 | 9,77585872 | 10,03108747 |
| 9,63123346 | 9,78991669 | 10,05039672 |
| 9,64164836 | 9,80429565 | 10,07006390 |
| 9,65235161 | 9,85718656 | 10,09009116 |
| 9,66334607 | 9,87304135 | 10,11048062 |
| 9,67463455 | 9,88923095 | 10,13123435 |
| 9,68621987 | 9,90575779 | 10,15235439 |
| 9,69810480 | 9,92262428 | 10,17384275 |
| 9,71029210 | 9,93983281 | 10,19570139 |
| 9,72278448 | 9,95738572 |             |

## Полоса 001—100

|             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|
| 10,58841900 | 11,04470940 | 11,61726318 |
| 10,60062644 | 11,06501204 | 11,63030402 |
| 10,61310290 | 11,08562903 | 11,64363687 |
| 10,62584867 | 11,10656357 | 11,65726303 |
| 10,63886409 | 11,12781897 | 11,67118389 |
| 10,65214962 | 11,14939871 | 11,68540097 |
| 10,66570577 | 11,17130639 | 11,69991589 |
| 10,67953319 | 11,19354572 | 11,71473039 |
| 10,69363257 | 11,21612059 | 11,72984633 |
| 10,70800473 | 11,23903501 | 11,81846619 |
| 10,72265056 | 11,26229313 | 11,83559484 |
| 10,73757106 | 11,28589928 | 11,85304268 |
| 10,75276730 | 11,30985791 | 11,87081258 |
| 10,76824046 | 11,33417365 | 11,88890760 |
| 10,78399183 | 11,35885125 | 11,90733089 |
| 10,80002276 | 11,38389568 | 11,92608578 |
| 10,81633473 | 11,40931204 | 11,94517571 |
| 10,83292931 | 11,49282306 | 11,96460427 |
| 10,84980818 | 11,50270688 | 11,98437521 |
| 10,86697309 | 11,51287542 | 12,00449241 |
| 10,88442594 | 11,52332884 | 12,02495992 |
| 10,90216870 | 11,53406738 | 12,04578194 |
| 10,92020346 | 11,54509140 | 12,06696282 |
| 10,93853242 | 11,55640135 | 12,08850708 |
| 10,96658256 | 11,56799780 | 12,11041941 |
| 10,98565737 | 11,57988138 | 12,13270467 |
| 11,00503495 | 11,59205288 | 12,15536788 |
| 11,02471801 | 11,60451316 | 12,17841426 |

## Полоса 001—020

|            |            |             |
|------------|------------|-------------|
| 9,49185112 | 9,64624766 | 9,88117435  |
| 9,49995782 | 9,65773242 | 9,89685583  |
| 9,50826101 | 9,66944390 | 9,91279050  |
| 9,51676274 | 9,68138381 | 9,92897965  |
| 9,52546505 | 9,69355383 | 9,94542451  |
| 9,53436995 | 9,70595561 | 9,96212632  |
| 9,54347943 | 9,71859080 | 9,97908626  |
| 9,55279546 | 9,75121048 | 9,99630549  |
| 9,56231997 | 9,76467517 | 10,01378513 |
| 9,57205489 | 9,77838035 | 10,03152628 |
| 9,58200213 | 9,79232753 | 10,04952999 |
| 9,59216355 | 9,80651821 | 10,06779729 |
| 9,60254101 | 9,82095385 | 10,08632916 |
| 9,61313635 | 9,83563588 | 10,10512655 |
| 9,62350138 | 9,85056572 | 10,12419038 |
| 9,63498789 | 9,86574476 | 10,14352152 |

Молекула  $^{14}\text{C}^{16}\text{O}_2$

## Полоса 001—100

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 11,329 | 11,677 | 11,794 |
| 11,346 | 11,700 | 11,819 |
| 11,364 | 11,723 | 11,843 |
| 11,382 | 11,746 | 11,868 |
| 11,400 | 11,770 |        |

Молекула  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ 

## Полоса 100—010

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 16,596 | 17,596 | 17,821 |
| 16,780 | 17,639 | 17,915 |
| 16,927 | 17,684 | 17,962 |
| 16,970 | 17,730 | 18,010 |
| 17,280 | 17,775 | 18,053 |
| 17,463 |        |        |

Активная среда  $\text{NO}_2$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера $\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ11,0  
16,63Активная среда  $\text{CO}_2$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера $\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ6,26  
11,1Активная среда  $\text{N}_2\text{O}$ . Условия возбуждения: импульсный и непрерывный разряды в смеси  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и He (соотношение в смеси 1:3,5:40) при  $P = 1,7$  кПа; оптическая накачка лазером на HBr (4,465 МКМ), в режиме газодинамического лазера (9,48 и 10,65 МКМ) [6] $\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

## Полоса 001—010

9,48

## Полоса 001—100

|         |         |         |
|---------|---------|---------|
| 10,3456 | 10,5602 | 10,8000 |
| 10,3532 | 10,5692 | 10,8104 |
| 10,3609 | 10,5761 | 10,8208 |
| 10,3687 | 10,5872 | 10,8312 |
| 10,3765 | 10,5963 | 10,8418 |
| 10,3843 | 10,6054 | 10,8523 |
| 10,3922 | 10,6146 | 10,8629 |
| 10,4001 | 10,6239 | 10,8736 |
| 10,4081 | 10,6332 | 10,8844 |
| 10,4161 | 10,6426 | 10,8952 |
| 10,4242 | 10,65   | 10,9061 |
| 10,4323 | 10,6614 | 10,9170 |
| 10,4405 | 10,6710 | 10,9280 |
| 10,4570 | 10,6806 | 10,9390 |
| 10,4653 | 10,6903 | 10,9501 |
| 10,4737 | 10,6999 | 10,9613 |
| 10,4821 | 10,7097 | 10,9726 |
| 10,4906 | 10,7195 | 10,9839 |
| 10,4991 | 10,7294 | 10,9953 |
| 10,5077 | 10,7393 | 11,0067 |
| 10,5163 | 10,7493 | 11,0182 |
| 10,5250 | 10,7593 | 11,0298 |
| 10,5337 | 10,7694 | 11,0415 |
| 10,5425 | 10,7796 |         |
| 10,5513 | 10,7898 |         |

## Полоса 002—101

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 10,40331 | 10,55089 | 10,80453 |
| 10,41107 | 10,55958 | 10,81471 |
| 10,41889 | 10,56832 | 10,82495 |
| 10,42676 | 10,57712 | 10,83524 |
| 10,43468 | 10,58596 | 10,84560 |
| 10,44265 | 10,59486 | 10,85601 |
| 10,45067 | 10,60382 | 10,86648 |
| 10,45874 | 10,61282 | 10,87701 |
| 10,46686 | 10,62189 | 10,88760 |
| 10,47503 | 10,63100 | 10,89825 |
| 10,48325 | 10,64017 | 10,90896 |
| 10,49157 | 10,64939 | 10,91973 |
| 10,49985 | 10,65861 | 10,93056 |
| 10,50823 | 10,66784 | 10,94145 |
| 15,51666 | 10,67707 | 10,95241 |
| 10,52513 | 10,68630 | 10,96342 |
| 10,53367 | 10,69553 | 10,97450 |
| 10,54225 | 10,70476 | 10,98564 |
|          | 10,71399 | 10,99684 |

Активная среда  $\text{S}_2\text{O}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера $\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ12,87  
20,57Активная среда OCS. Условия возбуждения: импульсный разряд в OCS или смесях OCS и He, OCS и  $\text{N}_2$ , OCS и CO, OCS и CO + He; оптическая накачка импульсным  $\text{CO}_2$ -лазером $\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

3,428

## Полоса 001—100

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 8,2388 | 8,3654 | 8,3962 |
| 8,2416 | 8,3685 | 8,3999 |
| 8,2439 | 8,3715 | 8,4024 |
| 8,2518 | 8,3746 | 8,4055 |
| 8,2543 | 8,3779 | 8,4065 |
| 8,2571 | 8,3809 | 8,4117 |
| 8,2595 | 8,3839 | 8,4146 |
| 8,2623 | 8,3870 | 8,4178 |
| 8,2645 | 8,3900 | 8,4213 |
| 8,2673 | 8,3930 | 8,4243 |
| 8,3625 |        |        |

## Полоса?

|        |       |
|--------|-------|
| 18,983 | 123,0 |
| 19,057 | 132,0 |

Активная среда  $\text{CH}_2$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера $\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ4,76  
5,26

Активная среда  $\text{CS}_2$ . Условия возбуждения: в смеси  $\text{CS}_2$  (13 Па) и  $\text{N}_2$  (250 Па) с прокачкой рабочей среды; перед смешиванием  $\text{N}_2$  возбуждается в непрерывном разряде; в поперечном разряде при атмосферном давлении с преионизацией электронным пучком

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|
| 11,482                              | 11,510 | 11,531 |
| 11,489                              | 11,517 | 11,538 |
| 11,596                              | 11,524 | 11,545 |
| 11,503                              |        |        |

Молекула  $^{13}\text{C}^{32}\text{S}_2$

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 11,960 | 11,986 | 12,241 |
| 11,965 | 12,217 | 12,249 |

Активная среда  $\text{HCO}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 7,15                                |
| 16,1                                |

Активная среда  $\text{DCO}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 9,92                                |

Активная среда  $\text{FCO}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 8,15                                |
| 11,90                               |

Активная среда  $\text{COS}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 6,43                                |
| 8,24                                |

Активная среда  $\text{HCN}$ . Условия возбуждения: импульсный разряд в различных газовых смесях, к примеру  $\text{CH}_4$  и  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2$ ; многие линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера (3,69, 7,19, 7,63 мкм) [6]

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |         |          |
|-------------------------------------|---------|----------|
| 3,69                                | 116,132 | 284,0    |
| 7,19                                | 126,164 | 309,7140 |
| 7,63                                | 128,629 | 310,8870 |
| 81,554                              | 130,838 | 335,1831 |
| 96,401                              | 134,932 | 336,5578 |
| 98,693                              | 138,768 | 372,5283 |
| 101,257                             | 165,150 | 538,2    |
| 110,240                             | 201,059 | 545,4    |
| 112,066                             | 211,001 | 676,0    |
| 113,311                             | 222,949 | 773,5    |

Активная среда  $\text{DCN}$ . Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси  $\text{D}_2$  и  $\text{BrCN}$  или  $\text{CD}_4$  и  $\text{ND}_3$ ; некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера (4,31 и 12,62 мкм) [6]

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|
| 4,31                                 | 189,9490 | 194,7644 |
| 12,62                                | 190,0080 | 204,3872 |
| 181,789                              | 194,7027 |          |

Активная среда  $\text{HNC}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 6,68                                |

Активная среда  $\text{FCN}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 8,25                                |

Активная среда  $\text{ClCN}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 5,44                                |
| 6,81                                |

Активная среда  $\text{BrCN}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 5,38                                |
| 6,16                                |

Активная среда  $\text{ICN}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 5,93                                |
| 6,45                                |

Активная среда  $\text{NH}_2$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 15,4                                |

Активная среда  $\text{NF}_2$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 18,8                                |
| 25,4                                |

Активная среда  $\text{FNO}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 9,28                                |

Активная среда  $\text{ClNO}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 8,24                                |

Активная среда  $\text{BrNO}$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |
|-------------------------------------|
| 6,52                                |

Активная среда  $\text{H}_2\text{O}$ . Условия возбуждения: импульсный разряд в парах  $\text{H}_2\text{O}$  при  $P = 50 \div 130$  Па; некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера (4,19 и 4,57 мкм) [6]

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|
| 2,28                                | 4,77  | 7,287 |
| 4,19                                | 7,095 | 7,299 |
| 4,57                                | 7,206 | 7,392 |

Продолжение табл. 34.2

|           |        |           |
|-----------|--------|-----------|
| 7,427     | 32,924 | 49,430    |
| 7,459     | 33,308 | 53,910    |
| 7,545     | 33,329 | 55,000    |
| 7,567     | 34,60  | 55,088    |
| 7,592     | 35,017 | 56,129    |
| 7,709     | 35,383 | 57,659    |
| 7,711     | 35,833 | 57,799    |
| 7,712     | 36,606 | 66,800    |
| 7,742     | 37,848 | 66,903    |
| 9,4773    | 38,086 | 67,169    |
| 9,570     | 39,695 | 72,856    |
| 11,83     | 40,45  | 73,401    |
| 11,96     | 40,638 | 78,443329 |
| 16,932    | 42,51  | 79,091010 |
| 23,13     | 45,517 | 85,564    |
| 23,365    | 45,91  | 86,301    |
| 24,966    | 47,244 | 86,471    |
| 25,162    | 47,39  | 87,323    |
| 26,595    | 47,468 | 87,469    |
| 26,660    | 47,687 | 89,772    |
| 27,970755 | 48,19  | 115,32    |
| 28,054    | 48,366 | 118,59104 |
| 28,270    | 48,676 | 120,08    |
| 28,295    | 48,765 | 220,260   |
| 28,356    | 49,06  | 350,20    |
| 28,451    |        |           |

Активная среда  $D_2O$ . Условия возбуждения: импульсный разряд в парах  $D_2O$  при  $P = 27 \div 130$  Па; некоторые линии возбуждаются также непрерывно; оптическая накачка излучением  $CO_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ 

|        |           |           |
|--------|-----------|-----------|
| 26,36  | 56,830    | 103,33    |
| 33,896 | 61,182    | 107,72019 |
| 35,081 | 71,944    | 107,91    |
| 36,096 | 72,427    | 108,88    |
| 36,324 | 72,747780 | 110,49    |
| 36,526 | 73,337    | 111,74    |
| 37,788 | 74,341    | 170,08    |
| 37,864 | 74,526    | 171,67    |
| 39,53  | 76,305    | 239       |
| 40,994 | 78,16     | 263       |
| 41,79  | 83,730    | 276       |
| 48,80  | 84,111    | 358,5     |
| 50,71  | 84,278897 | 385       |
| 54,73  | 99,00     |           |

Активная среда  $SO_2$ . Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси  $SO_2$  (50 Па) и He (500 Па); некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера (3,76 и 4,96 мкм) [6]

 $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ 

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 3,76   | 141,06 | 151,35 |
| 4,96   | 142,00 | 192,80 |
| 139,83 | 149,94 | 206,53 |
| 140,82 | 151,08 | 215,27 |

Активная среда  $H_2S$ . Условия возбуждения: импульсный разряд в  $H_2S$  при  $P = 20$  Па; в режиме газодинамического лазера (6,58 и 6,63 мкм) [6]

 $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ 

|         |        |        |
|---------|--------|--------|
| 6,58    | 52,307 | 73,54  |
| 6,63    | 55,612 | 81,45  |
| 33,30   | 60,224 | 83,45  |
| 37,6000 | 61,413 | 87,580 |
| 48,70   | 62,6   | 92,0   |

Продолжение табл. 34.2

|       |        |       |
|-------|--------|-------|
| 96,4  | 126,2  | 140,8 |
| 103,3 | 129,1  | 162,4 |
| 108,8 | 130,60 | 192,9 |
| 116,8 | 135,3  | 225,3 |

Активная среда  $D_2S$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

 $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ 

9,19

9,31

Активная среда  $BF_3$  [6]. Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера

 $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ 

11,92

26,35

Активная среда  $BCl_3$ . Условия возбуждения: непрерывный режим при добавлении паров  $BCl_3$  к газовой смеси  $CO_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ 

18,3

19,4

22,4

18,8

20,2

23,0

19,1

20,6

Активная среда  $SF_6$ . Условия возбуждения: импульсное возбуждение при двухфотонном поглощении излучения  $CO_2$ -лазера (10,6 мкм)

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ 

15,9005

Активная среда  $NH_3$ . Условия возбуждения: импульсный разряд с высокой плотностью тока в  $NH_3$  при  $P = 70 \div 130$  Па; оптическая накачка лазерами на  $N_2O$ ,  $CO_2$ , HF

 $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ 

|         |         |         |
|---------|---------|---------|
| 6,27    | 12,316  | 25,4744 |
| 6,69    | 12,348  | 25,8839 |
| 9,3     | 12,520  | 26,1046 |
| 9,6     | 12,526  | 26,4416 |
| 9,7     | 12,541  | 26,7068 |
| 9,9     | 12,566  | 27,8437 |
| 10,2    | 12,591  | 34,2248 |
| 10,5    | 12,631  | 35,1573 |
| 10,6    | 12,689  | 35,5011 |
| 10,7    | 12,8115 | 36,02   |
| 11,0    | 12,812  | 36,1686 |
| 11,446  | 12,851  | 49,0356 |
| 11,459  | 12,876  | 54,45   |
| 11,526  | 12,921  | 56,8631 |
| 11,5547 | 13,031  | 58,01   |
| 11,721  | 13,114  | 63,25   |
| 11,80   | 13,124  | 64,5    |
| 11,811  | 13,145  | 64,7274 |
| 11,994  | 13,176  | 67,19   |
| 12,010  | 13,269  | 67,24   |
| 12,078  | 13,218  | 72,6    |
| 12,0791 | 13,331  | 72,76   |
| 12,1143 | 13,411  | 74,15   |
| 12,1558 | 13,576  | 78,28   |
| 12,1846 | 13,7261 | 81,53   |
| 12,245  | 13,821  | 83,60   |
| 12,251  | 15,8782 | 83,85   |
| 12,266  | 15,9452 | 84,64   |
| 12,280  | 18,9250 | 87,1    |
| 12,286  | 19,5497 | 88,05   |

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 88,20  | 151,5  | 290,4  |
| 88,90  | 155,17 | 290,9  |
| 90,50  | 155,28 | 291,2  |
| 90,93  | 216,44 | 291,35 |
| 92,87  | 223,91 | 291,95 |
| 112,98 | 225,39 | 301,2  |
| 114,29 | 225,07 | 306,28 |
| 119,02 | 256,61 | 311,75 |
| 147,04 | 263,43 | 388    |
| 147,2  | 280,5  | 404,89 |
| 147,15 | 281,35 |        |
| 151,49 | 281,48 |        |

Молекула  $^{15}\text{NH}_3$ 

|      |       |       |
|------|-------|-------|
| 14,3 | 16,0  | 375,9 |
| 14,6 | 17,8  | 218,9 |
| 15,2 | 89,68 | 111,9 |
| 15,7 |       |       |

Активная среда  $\text{PH}_3$ . Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 77,58  | 116,88 | 166,73 |
| 83,77  | 117,01 | 166,79 |
| 89,76  | 121,45 | 166,84 |
| 89,80  | 129,78 | 166,87 |
| 90,26  | 129,98 | 180,54 |
| 97,19  | 130,14 | 182    |
| 97,30  | 135,95 | 186,25 |
| 102,62 | 136,71 | 187,56 |
| 104,4  | 140,85 | 194,47 |
| 106,04 | 145,88 | 194,70 |
| 106,05 | 146,07 | 194,89 |
| 106,09 | 146,34 | 195,18 |
| 106,23 | 155,07 | 223,07 |
| 109,7  | 156,34 |        |

Активная среда  $\text{NOCl}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 16,4  | 16,69 | 16,86 |
| 16,52 | 16,7  | 16,9  |
| 16,57 | 16,75 | 16,99 |

Активная среда  $\text{CF}_4$ . Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 15,33 | 15,74 | 16,12 |
| 15,41 | 15,76 | 16,18 |
| 15,49 | 15,77 | 16,20 |
| 15,50 | 15,84 | 16,24 |
| 15,55 | 15,85 | 16,26 |
| 15,56 | 15,91 | 16,27 |
| 15,58 | 15,94 | 16,31 |
| 15,60 | 16,00 | 16,35 |
| 15,61 | 16,03 | 16,40 |
| 15,62 | 16,07 | 16,85 |
| 15,70 | 16,10 |       |

Активная среда  $\text{CF}_3\text{Br}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм823,4  
885,2

Активная среда  $\text{CF}_3\text{I}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм13,54  
13,57  
13,63

Активная среда  $\text{C}_2\text{H}_2$ . Условия возбуждения: импульсное возбуждение смеси  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{He}$  с прокачкой рабочей среды; оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|        |       |       |
|--------|-------|-------|
| 8,0334 | 17,45 | 19,03 |
| 8,0340 | 17,61 | 19,13 |
| 8,0347 | 17,77 | 19,21 |
| 8,0356 | 18,67 | 19,27 |
| 8,0380 | 18,79 | 19,67 |
| 8,0409 | 18,85 | 20,01 |
| 8,0442 | 18,96 | 20,44 |

Активная среда  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм10,53  
10,98

Активная среда  $\text{H}_2\text{CO}$ . Условия возбуждения: импульсный разряд при  $P = 7 \div 50$  Па; оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 101,9 | 155,1 | 163,8 |
| 119,6 | 157,6 | 170,2 |
| 122,8 | 159,5 | 184,4 |
| 125,9 |       |       |

HDClO

195

196

 $\text{D}_2\text{CO}$ 

233

733,5739

245

752,6807

279

Активная среда  $(\text{H}_2\text{CO})_3$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|     |     |          |
|-----|-----|----------|
| 384 | 680 | 815      |
| 433 | 696 | 890      |
| 460 | 712 | 891      |
| 512 | 750 | 948,9247 |
| 619 |     |          |

Активная среда  $\text{HCOOH}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 229,39   | 336      | 401      |
| 254,80   | 336,3    | 403      |
| 278,61   | 342,74   | 404,1    |
| 302,08   | 359,81   | 405,5848 |
| 302,2781 | 368      | 405,75   |
| 309,23   | 388      | 406      |
| 311,45   | 392      | 413      |
| 319,48   | 393,6311 | 414      |
| 334,82   | 394,2    | 418,51   |
| 334,91   | 396      | 418,6    |

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 419,55   | 446,75   | 533,6773 |
| 420      | 446,8730 | 534,5    |
| 420,26   | 447      | 534,8    |
| 421      | 447,58   | 577      |
| 428      | 458,43   | 580,3872 |
| 432,1093 | 458,5229 | 580,52   |
| 432,6313 | 458,6    | 582      |
| 432,6325 | 460,51   | 669,5308 |
| 433,10   | 452      | 670      |
| 435      | 493,28   | 742,5723 |
| 437,7    | 496      | 743      |
| 438      | 512,88   | 744,0503 |
| 441      | 513,2    | 745      |
| 445,21   | 515,1690 | 761      |
| 445,81   | 518,83   | 785      |
| 445,8971 | 530      | 786,1617 |
| 446,5054 |          |          |

## HCOOD

462  
925

## DCOOD

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 305 | 492 | 790 |
| 349 | 526 | 937 |
| 381 | 569 |     |

Активная среда  $\text{CH}_2\text{F}_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|       |       |        |
|-------|-------|--------|
| 95,5  | 193,9 | 355,2  |
| 105,5 | 194,5 | 381,8  |
| 109,3 | 202,5 | 382,9  |
| 117,7 | 214,5 | 394,7  |
| 121,7 | 227,6 | 418,1  |
| 122,4 | 230,1 | 432,4  |
| 122,4 | 235,7 | 434,9  |
| 134,0 | 236,5 | 464,5  |
| 135,3 | 255,9 | 503,6  |
| 158,5 | 261,7 | 511,3  |
| 158,9 | 270,0 | 540,8  |
| 165,8 | 272,2 | 567,5  |
| 165,9 | 287,7 | 588,1  |
| 166,6 | 289,4 | 642,5  |
| 166,6 | 293,9 | 657,2  |
| 184,3 | 298,2 | 725,1  |
| 191,8 | 326,5 | 1448,1 |

Активная среда  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера. Непрерывный режим генерации

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 249 | 342 | 631 |
| 254 | 469 | 829 |
| 258 | 520 |     |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{F}$ . Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; линии с  $\lambda \approx 496$  мкм возбуждаются и в непрерывном режиме

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|        |        |        |
|--------|--------|--------|
| 9,75   | 196,0  | 251,91 |
| 190,3  | 199,14 | 372,68 |
| 192,78 | 200,3  | 397,51 |
| 195,0  | 215,3  | 419    |

|         |          |         |
|---------|----------|---------|
| 451,903 | 496,072  | 541,147 |
| 451,924 | 496,1009 | 595     |
| 494     | 541,113  | 1221,79 |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{Cl}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|        |        |         |
|--------|--------|---------|
| 227,15 | 275,09 | 397,6   |
| 236,25 | 281,67 | 461,20  |
| 240,98 | 286,79 | 511,90  |
| 250,4  | 307,65 | 568,81  |
| 254    | 333,96 | 870,80  |
| 261,03 | 349,34 | 943,97  |
| 271,29 | 354    | 958,25  |
| 273,7  | 364,5  | 968     |
| 275,00 | 378,57 | 1886,87 |

 $\text{CD}_3\text{Cl}$ 

|        |        |         |
|--------|--------|---------|
| 224    | 318    | 519,30  |
| 245    | 383,28 | 698,55  |
| 246    | 443,26 | 735,12  |
| 249    | 449,79 | 883,59  |
| 288    | 464,76 | 1239,47 |
| 288    | 480,31 | 1990,75 |
| 291,27 |        |         |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{Br}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{возд}}$ , мкм

|        |        |         |
|--------|--------|---------|
| 245,04 | 407,72 | 658,53  |
| 264,05 | 414,98 | 660,70  |
| 279,81 | 418,31 | 715,40  |
| 294,28 | 422,78 | 749,29  |
| 311,07 | 508,48 | 749,36  |
| 311,10 | 531,06 | 831,13  |
| 311,20 | 545,21 | 925,52  |
| 311,21 | 545,39 | 990,15  |
| 332,86 | 564,68 | 1310,38 |
| 333,15 | 585,72 | 1572,64 |
| 352,75 | 631,93 | 1965,34 |
| 380,02 | 632,00 |         |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{I}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

 $\lambda_{\text{вак}}$ , мкм

|          |        |          |
|----------|--------|----------|
| 377,45   | 508,37 | 583,87   |
| 390,53   | 517,33 | 639,73   |
| 392,48   | 525,32 | 670,99   |
| 447,1424 | 529,28 | 719,30   |
| 457,25   | 542,99 | 964      |
| 459,18   | 576,17 | 1063,29  |
| 477,87   | 578,90 | 1253,738 |

 $\text{CD}_3\text{I}$ 

|          |          |           |
|----------|----------|-----------|
| 272      | 569,4773 | 734,2624  |
| 301      | 599,5499 | 745       |
| 390      | 614,1098 | 788,48    |
| 433,1038 | 640      | 895       |
| 444,3862 | 644      | 918,6101  |
| 460,5619 | 660,5822 | 953,8799  |
| 487,2260 | 667,2322 | 981,7094  |
| 490,3909 | 670,0940 | 1005,3476 |
| 523,4061 | 670,1143 | 1099,5441 |
| 540      | 691,1292 | 1549,5048 |
| 556,8755 | 730,3234 |           |



Активная среда  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|
| 37,5                                | 164,5076  | 251,56    |
| 40,2                                | 164,77    | 253,6     |
| 42,18                               | 164,7832  | 254,1     |
| 43,4                                | 170,57638 | 263,7     |
| 43,47                               | 171,3     | 264,6     |
| 55,39                               | 185,5     | 267,4432  |
| 58,1                                | 186,03    | 278,8     |
| 60,25                               | 190,3209  | 280,96    |
| 65,1                                | 191,2     | 290,62    |
| 65,6                                | 191,57    | 292,2     |
| 69,70                               | 191,58    | 292,5     |
| 70,511716                           | 191,63    | 293,78    |
| 73,30                               | 193,2     | 301,9943  |
| 77,92                               | 194,01    | 369,11368 |
| 80,3                                | 198,8     | 386,20    |
| 80,6                                | 202,4     | 390,1     |
| 85,59                               | 205,3     | 392,06871 |
| 92,60                               | 206,9     | 416,5224  |
| 92,69                               | 209,89    | 417,8     |
| 96,522394                           | 211,25    | 451,9     |
| 97,48                               | 214,35    | 469,02330 |
| 117,95                              | 218,22    | 470       |
| 118,83409                           | 223,5     | 471       |
| 129,5497                            | 232,85    | 486,1     |
| 133,1196                            | 232,93906 | 570,56864 |
| 151,35                              | 237,6     | 603,06    |
| 159,2                               | 242,4727  | 614,92    |
| 162                                 | 242,79    | 627,34    |
| 163,03353                           | 246       | 694,17    |
| 163,9                               | 250,78129 | 695       |
| 164                                 | 251,13983 | 699,42258 |
| 164,3                               |           |           |

 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ 

|           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|
| 85,31729  | 149,27226 | 268,57203 |
| 86,11179  | 152,07568 | 280,21826 |
| 103,48081 | 157,92848 | 280,23974 |
| 115,82324 | 203,63578 | 332,6033  |
| 118,01314 | 208,41205 | 338,9737  |
| 146,09739 | 238,52268 | 461,3848  |
| 148,59041 |           |           |

 $\text{CD}_3\text{OH}$ 

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 34,8  | 179   | 277   |
| 37,6  | 182,4 | 278   |
| 40,1  | 184   | 285   |
| 41,5  | 191,9 | 286,6 |
| 41,8  | 201   | 287,4 |
| 43,9  | 219,9 | 290,0 |
| 49,8  | 222   | 297   |
| 52,9  | 223   | 299   |
| 60,8  | 232   | 309   |
| 71,0  | 236   | 310   |
| 76,1  | 238,3 | 321   |
| 82,1  | 253,2 | 336   |
| 86,4  | 258,7 | 346   |
| 102,6 | 266   | 350   |
| 112,3 | 266,2 | 351   |
| 128,7 | 267   | 352   |
| 144,0 | 268   | 353   |
| 158   | 276   | 370   |

|     |     |      |
|-----|-----|------|
| 385 | 483 | 695  |
| 386 | 495 | 702  |
| 398 | 498 | 703  |
| 407 | 508 | 711  |
| 409 | 517 | 722  |
| 410 | 551 | 745  |
| 412 | 553 | 760  |
| 419 | 554 | 774  |
| 421 | 583 | 862  |
| 422 | 599 | 968  |
| 435 | 646 | 1100 |
| 455 | 648 | 1146 |
| 472 | 680 | 1290 |
| 480 | 685 |      |

 $\text{CH}_3\text{OD}$ 

|       |           |           |
|-------|-----------|-----------|
| 46,7  | 134       | 225       |
| 57    | 134,7     | 229,1     |
| 69,5  | 134,8     | 238       |
| 70,3  | 136       | 294,81097 |
| 100,8 | 145,66171 | 305,72610 |
| 104   | 212,8     | 330,1     |
| 110   | 215,37244 | 417,1     |
| 117   |           |           |

 $\text{CD}_3\text{OD}$ 

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 35  | 184 | 312 |
| 41  | 229 | 354 |
| 78  | 255 | 406 |
| 119 | 312 | 414 |
| 150 | 339 | 495 |
| 165 | 299 | 869 |

 $\text{CH}_2\text{DOH}$ 

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 109 | 238 | 322 |
| 125 | 250 | 364 |
| 151 | 272 | 374 |
| 164 | 295 | 396 |
| 167 | 296 | 468 |
| 171 | 308 | 616 |
| 207 |     |     |

 $\text{CHD}_2\text{OH}$ 

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 165 | 260 | 426 |
| 168 | 346 | 483 |
| 179 | 355 | 513 |
| 238 | 363 |     |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{CN}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

| $\lambda_{\text{вак}}, \text{ мкм}$ |        |         |
|-------------------------------------|--------|---------|
| 281,18                              | 427,04 | 704,53  |
| 281,96                              | 430,55 | 713,72  |
| 286,88                              | 441,15 | 741,62  |
| 303,54                              | 453,41 | 854,41  |
| 346,32                              | 466,25 | 1014,89 |
| 372,87                              | 480,01 | 1016,33 |
| 380,71                              | 494,74 | 1086,89 |
| 386,41                              | 510,16 | 1146,83 |
| 387,31                              | 561,41 | 1351,78 |
| 388,39                              | 652,68 | 1814,37 |
| 422,14                              |        |         |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{NC}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

280  
288  
404

Активная среда  $\text{CH}_3\text{CCH}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

$\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

|        |  |        |  |         |
|--------|--|--------|--|---------|
| 427,89 |  | 563,13 |  | 675,29  |
| 428,87 |  | 566,04 |  | 757,41  |
| 488,88 |  | 583,77 |  | 798,55  |
| 516,77 |  | 647,89 |  | 1097,11 |
| 531,08 |  | 649,59 |  | 1174,87 |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

$\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

|       |  |     |  |     |
|-------|--|-----|--|-----|
| 99,5  |  | 159 |  | 201 |
| 104   |  | 164 |  | 208 |
| 115,5 |  | 166 |  | 218 |
| 118   |  | 168 |  | 219 |
| 126   |  | 176 |  | 243 |
| 134   |  | 175 |  | 251 |
| 139   |  | 177 |  | 267 |
| 141   |  | 180 |  | 268 |
| 143   |  | 183 |  | 288 |
| 147   |  | 194 |  | 314 |
| 148,5 |  | 198 |  | 347 |
| 153   |  |     |  |     |

Активная среда  $\text{CH}_2\text{CF}_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

$\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

|       |  |       |  |       |
|-------|--|-------|--|-------|
| 288,5 |  | 532   |  | 884   |
| 375,0 |  | 554,4 |  | 890,0 |
| 415   |  | 568   |  | 890,1 |
| 458   |  | 663,3 |  | 990   |
| 464,3 |  | 764,1 |  | 1020  |

Активная среда  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ . Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера

$\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

|       |  |     |  |     |
|-------|--|-----|--|-----|
| 62,5  |  | 132 |  | 250 |
| 69,1  |  | 135 |  | 252 |
| 70,1  |  | 164 |  | 262 |
| 75,2  |  | 169 |  | 277 |
| 77,4  |  | 171 |  | 288 |
| 90,8  |  | 185 |  | 290 |
| 95,8  |  | 189 |  | 299 |
| 109,1 |  | 192 |  | 344 |
| 117,1 |  | 197 |  | 358 |
| 118   |  | 200 |  | 388 |
| 118,9 |  | 231 |  | 415 |
| 125,8 |  | 240 |  | 696 |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{F}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

|       |  |        |  |        |
|-------|--|--------|--|--------|
| 206,6 |  | 376    |  | 519    |
| 217,1 |  | 378    |  | 540,9  |
| 226,9 |  | 404    |  | 593,32 |
| 264,7 |  | 405    |  | 620,4  |
| 282,3 |  | 405,50 |  | 851,9  |
| 330,2 |  | 462,92 |  | 1013   |
| 336,7 |  | 486    |  | 1069   |
| 362,1 |  | 502,2  |  | 1546   |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{CHF}_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 458 |  | 533 |
| 464 |  | 755 |

Активная среда  $\text{CH}_3\text{CF}_3$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

379

Активная среда  $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

|      |  |      |
|------|--|------|
| 900  |  | 1400 |
| 1350 |  | 1720 |

Активная среда  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

396

Активная среда  $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{вак}}$ , МКМ

|       |  |       |  |      |
|-------|--|-------|--|------|
| 368   |  | 532   |  | 699  |
| 424   |  | 538   |  | 707  |
| 445   |  | 574   |  | 828  |
| 487   |  | 603   |  | 935  |
| 507,7 |  | 634,4 |  | 995  |
| 519   |  | 638   |  | 1041 |

Активная среда  $\text{C}_2\text{H}_3\text{Br}$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $\text{CO}_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

$\lambda_{\text{возд}}$ , МКМ

|        |  |        |  |          |
|--------|--|--------|--|----------|
| 283    |  | 528,49 |  | 784,26   |
| 356    |  | 553,69 |  | 826,94   |
| 370    |  | 594,72 |  | 853,43   |
| 396    |  | 618,44 |  | 900,13   |
| 411    |  | 624,09 |  | 943,22   |
| 416    |  | 635,35 |  | 936,15   |
| 419    |  | 646    |  | 963,48   |
| 424    |  | 649,42 |  | 985,85   |
| 427    |  | 680,54 |  | 989,19   |
| 438,5  |  | 693,13 |  | 990,63   |
| 443,5  |  | 707,22 |  | 1247,59  |
| 445    |  | 712    |  | 1383,88  |
| 482,96 |  | 724,13 |  | 1394,06  |
| 490,08 |  | 741,11 |  | 1614,88  |
| 506    |  | 780,13 |  | 1899,889 |

Активная среда  $C_2H_3CN$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $CO_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |     |      |
|--------------------------------------|-----|------|
| 270,6                                | 586 | 793  |
| 489                                  | 623 | 828  |
| 503                                  | 631 | 910  |
| 550                                  | 722 | 940  |
| 574,4                                | 738 | 1156 |
| 578                                  | 775 | 1184 |
| 584                                  |     |      |

Активная среда  $CH_3OCH_3$ . Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением  $CO_2$ -лазера

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |     |     |
|--------------------------------------|-----|-----|
| 375                                  | 480 | 495 |
| 462                                  | 492 | 520 |

Активная среда  $C_2H_2O$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $CO_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |  |     |
|--------------------------------------|--|-----|
| 148                                  |  | 336 |
| 156                                  |  | 516 |

Активная среда  $SiO_2$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $CO_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |  |     |
|--------------------------------------|--|-----|
| 112                                  |  | 204 |
| 176                                  |  | 216 |
| 196                                  |  |     |

Активная среда  $HCCF$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $CO_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |  |  |
|--------------------------------------|--|--|
| 509                                  |  |  |
| 1028                                 |  |  |

Активная среда  $FCN$ . Условия возбуждения: оптическая накачка излучением  $CO_2$ -лазера; непрерывный режим генерации

| $\lambda_{\text{возд}}, \text{ мкм}$ |  |  |
|--------------------------------------|--|--|
| 308                                  |  |  |

### 34.3. ЛАЗЕРЫ НА ПРИМЕСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Активным веществом лазеров на примесных кристаллах служат ионы элементов переходных групп, введенные в кристаллическую матрицу. Возбуждение ионов-активаторов осуществляется оптически, чаще всего с помощью газоразрядных импульсных ламп или ламп непрерывного действия. Энергетические уровни ионов-активаторов отличаются от уровней свободных ионов из-за взаимодействия с кристаллической матрицей, которое приводит к расщеплению и уширению электронных уровней иона, а также к образованию у них в ряде случаев колебательной структуры (рис.

34.10, 34.11). Наибольшее воздействие испытывают уровни, соответствующие внешним электронам ионов, так как внутренние электроны экранируются внешними оболочками.

Подавляющее число лазеров на примесных кристаллах генерирует излучение на чисто электронных переходах. Интерес к лазерам на электронно-колебательных переходах (рис. 34.11) связан в основном с возможностью перестройки длины волны излучения.

Одни и те же ионы-активаторы в зависимости от типа кристалла, в который они внедрены, образуют системы с различными генерационными параметрами. Большое влияние при этом оказывает температура активной среды, в зависимости от которой меняются радиационные параметры и спектр поглощения ионов-активаторов в кристалле.

Как правило, кристаллы до внедрения в них ионов-активаторов прозрачны на длине волны накачки, однако в ряде случаев в кристалл кроме ионов-активаторов вводятся также ионы-сенсбилизаторы, роль которых сводится к поглощению энергии накачки и передаче ее лазерному иону, что повышает эффективность лазера.

Из большого числа (более 270) существующих диэлектрических лазерных кристаллов наибольшее распространение получили кристаллы  $Y_3Al_5O_{12}$  (ИАГ — иттрий-алюминиевый гранат),  $YAlO_3$  (перовскит) с примесью ионов  $Nd^{3+}$ , а также  $Al_2O_3-Cr^{3+}$  (рубин). Замечательной особенностью этих соединений является удачное сочетание удовлетворительных спектрально-генерационных свойств с рядом таких необходимых качеств, как высокая механическая прочность, твердость, значительная теплопроводность и прозрачность в широком спектральном интервале. Повышенное эффективность кристаллических лазеров на ионах  $Nd^{3+}$  по сравнению с лазерами на ИАГ достигнуто за счет сенсбилизации лазерного кристалла ионами  $Cr^{3+}$ , обладающими широкими полосами поглощения в видимой области. Передача возбуждения от ионов  $Cr^{3+}$  на верхний лазерный уровень  $Nd^{3+}$  (рис. 34.10) происходит путем широкополосной люминесценции, связанной с электронно-колебательным переходом  ${}^4T_2-{}^4A_2$  (рис. 34.11).

Эффективность передачи возбуждения на низлежащего возбужденного состояния  $Cr^{3+} {}^2E$  на  ${}^4T_2$  определяется энергетическим зазором между этими состояниями, который сильно зависит от вида кристаллического поля. Это позволяет получить высокую эффективность передачи возбуждения от ионов  $Cr^{3+}$  к ионам  $Nd^{3+}$  в кристалле гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ) и, в конечном счете, достичь КПД лазера на ГСГГ —  $Nd^{3+}$  4,5%, что в 2,4 раза выше КПД лазера на ИАГ —  $Nd^{3+}$  в аналогичных условиях [11].

На электронно-колебательном переходе хрома  ${}^4T_2-{}^4A_2$  осуществлены также перестраиваемые по длине волны кристаллические лазеры, работающие при  $T=20^\circ\text{C}$ . Такие лазеры созданы на основе кристаллов александрита ( $BeAl_2O_4$ ) [12], а также на основе уже упоминавшихся кристаллов ГСГГ [13]. Диапазон перестройки составляет 730—800 нм для александрита и 766—820 нм для ГСГГ при полном КПД 2%.

В табл. 34.3 представлены длины волн и рабочие температуры генерации лазерных диэлектрических кристаллических систем. Лазерные системы разделены по активаторным (лазерным) ионам. Кристаллические матрицы перечисляются в алфавитном порядке. Если в кристалл добавляется сенсбилизатор, то обозначение соответствующего иона и его концентрация указываются в первой колонке через двоеточие при условии, что концентрация сенсбилизатора близка к содержанию активатора. Иногда сенсбилизующее действие оказывают ионы, входящие в структуру самой матрицы-основы. Например, формула кристалла  $LiYF_4$ , содержащего примерно равные доли Y и Er, в таблице записана

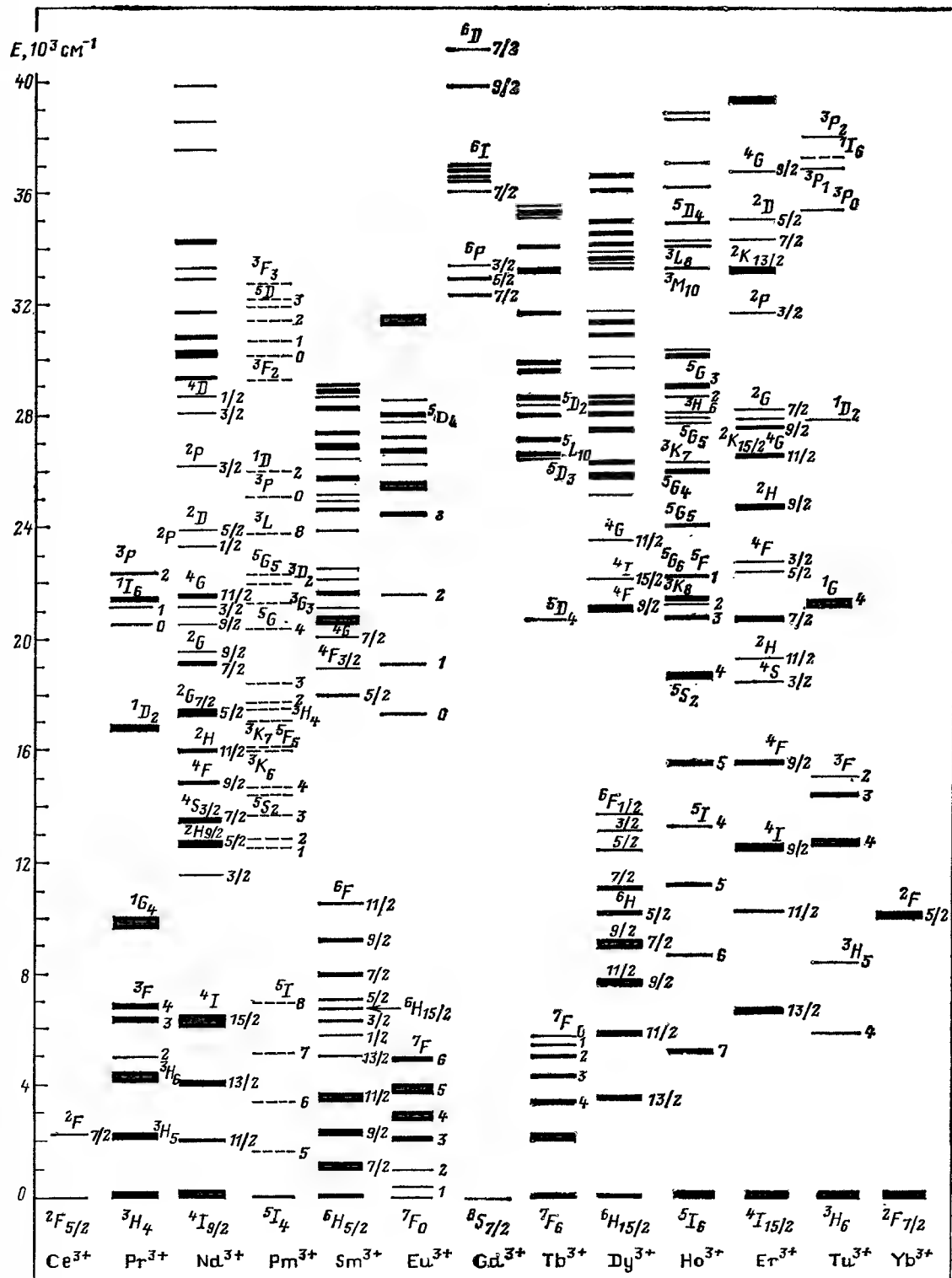


Рис. 34.10. Энергетические состояния редкоземельных (TR<sup>3+</sup>) ионов в кристаллах [10]

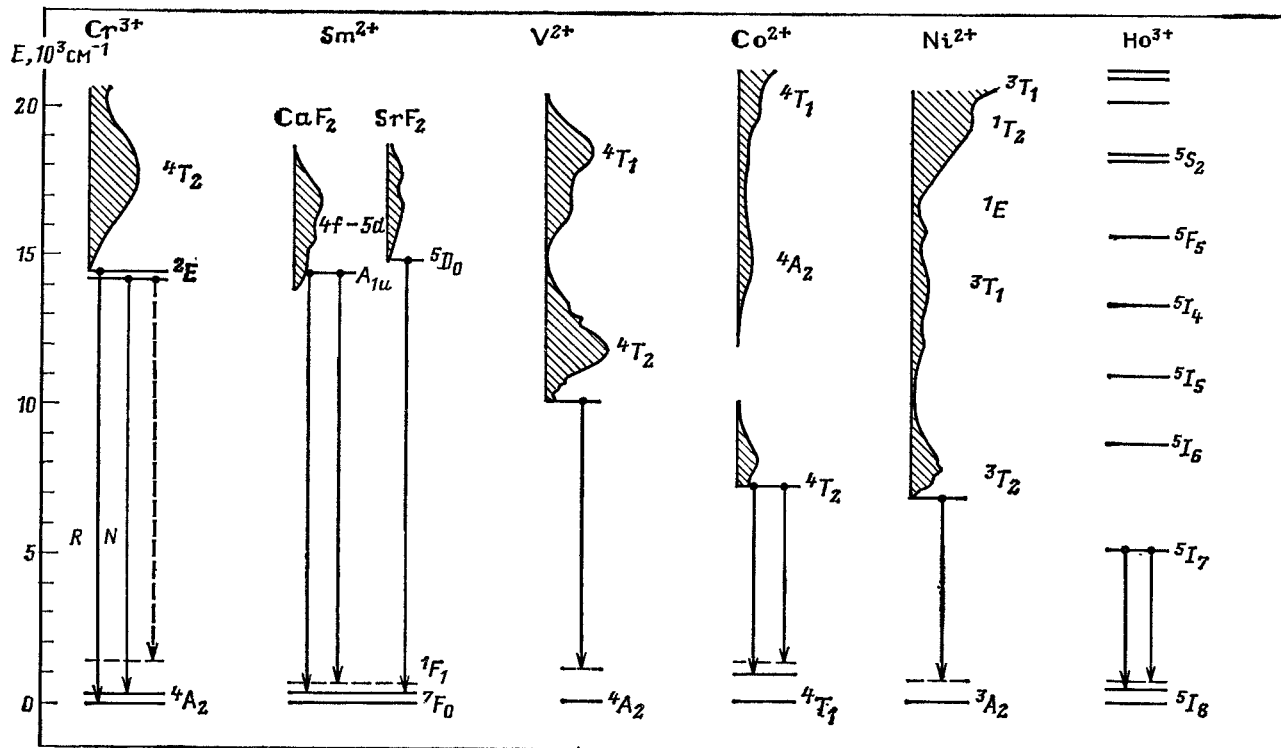


Рис. 34.11. Упрощенные рабочие схемы кристаллических лазеров, генерирующих на электронных и электронно-колебательных переходах [10]

так: Li(Y, Er) F<sub>4</sub>. Возможен также более сложный случай, например Li(Y, Er) F<sub>4</sub>: Ti<sup>3+</sup>. Здесь содержание ионов Ti<sup>3+</sup> (второго сенсibilизатора) невелико и приблизительно соответствует концентрации активаторных ионов. Может быть указано как массовое, так и атомное содержание сенсibilизирующей примеси, причем указанное значение может относиться как к исход-

ной шихте, так и к кристаллу. Для уточнения следует обратиться к оригинальным работам.

Более подробные сведения о лазерах на диэлектрических кристаллах, а также о физических и механических свойствах лазерных кристаллических матриц можно найти в монографии [14], а также в обзорах [10, 12].

Таблица 34.3. Длины волн генерации лазерных диэлектрических кристаллических систем [10]

| Кристалл                                                        | Лазерный переход                      | Длина волны генерации, мкм               | Температура, К |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| Группа железа                                                   |                                       |                                          |                |
| Хром (Cr <sup>3+</sup> , 3d <sup>3</sup> )                      |                                       |                                          |                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                  | ${}^2E(\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$  | 0,6943 (R <sub>1</sub> )                 | 300            |
|                                                                 |                                       | 0,6934                                   | 77             |
| BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                | ${}^2E(2\bar{A}) \rightarrow {}^4A_2$ | 0,6929 (R <sub>2</sub> )                 | 290            |
|                                                                 |                                       | 0,73—0,8                                 | 300            |
| Gd <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub> | ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ [12]    | 0,766—0,82                               | 300            |
| Cr <sup>52</sup>                                                | ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ [13]    | 0,6934089                                | ~70            |
|                                                                 |                                       | 0,6934255                                | ~70            |
| Cr <sup>50</sup>                                                | ${}^2E(\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$  | (Cr <sup>3+</sup> → Cr <sup>3+</sup> )*1 | 77             |
|                                                                 |                                       | 0,7009 (N <sub>2</sub> )                 | 77             |
| Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                  | ${}^2E(\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$  | 0,7041 (N <sub>1</sub> )                 | 77             |
|                                                                 |                                       | 0,6874                                   | 300            |

\*1 Генерация связана с парными центрами.

| Кристалл                             | Лазерный переход             | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------|
| Ванадий ( $V^{2+}$ , $3d^3$ )        |                              |                            |                |
| $MgF_2$                              | $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$    | 1,1213                     | 77             |
| Железо ( $Fe^{2+}$ , $3d^6$ )        |                              |                            |                |
| $n\text{-InP}$                       | $^5T_2 \rightarrow ^5E$ [15] | 3,53                       | 2              |
| Кобальт ( $Co^{2+}$ , $3d^7$ )       |                              |                            |                |
| $KMgF_3$<br>$KZnF_3$ [16]<br>$MgF_2$ | $^4T_2 \rightarrow ^4T_1$    | 1,821                      | 77             |
|                                      | $^4T_2 \rightarrow ^4T_1$    | 1,65—2,07                  | 80—200         |
|                                      | $^4T_2 \rightarrow ^4T_1$    | 1,750                      | 77             |
|                                      |                              | 1,8035                     | 77             |
|                                      |                              | 1,99                       | 77             |
| $ZnF_2$                              | $^4T_2 \rightarrow ^4T_1$    | 2,05                       | 77             |
|                                      |                              | 2,165                      | 77             |
| Никель ( $Ni^{2+}$ , $3d^8$ )        |                              |                            |                |
| $KMgF_3$<br>$MgF_2$                  | — [17]                       | 1,591                      | 77             |
|                                      | $^3T_2 \rightarrow ^3A_2$    | 1,623                      | 77             |
|                                      |                              | 1,636                      | 77             |
|                                      |                              | 1,674—1,676                | 85             |
|                                      |                              | 1,731—1,756                | 85             |
| $MgO$<br>$MnF_2$                     | $^3T_2 \rightarrow ^3A_2$    | 1,785—1,797                | 198—240        |
|                                      |                              | 1,3144                     | 77             |
|                                      | $^3T_2 \rightarrow ^3A_2$    | 1,915                      | 77             |
|                                      |                              | 1,922                      | 77             |
|                                      |                              | 1,865                      | 20             |
|                                      |                              | 1,929                      | 85             |
|                                      |                              | 1,939                      | 85             |

## Двухвалентные ионы редкоземельных элементов

|                                     |                                       |         |       |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------|-------|
| Самарий ( $Sm^{2+}$ , $4f^6$ )      |                                       |         |       |
| $CaF_2$                             | $5d \rightarrow {}^7F_1$              | 0,7085  | 20    |
|                                     |                                       | 0,708   | 65—90 |
|                                     |                                       | 0,720   | >65   |
|                                     |                                       | 0,729   | >65   |
| $SrF_2$                             | ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$         | 0,6969  | 4,2   |
|                                     |                                       |         |       |
| Диспрозий ( $Dy^{2+}$ , $4f^{10}$ ) |                                       |         |       |
| $CaF_2$                             | ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$         | 2,36    | 77    |
|                                     |                                       | 2,35867 | 77    |
| $SrF_2$                             | ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$         | 2,3659  | 77    |
| Тулий ( $Tu^{2+}$ , $4f^{13}$ )     |                                       |         |       |
| $CaF_2$                             | ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ | 1,116   | 27    |

## Трехвалентные ионы редкоземельных элементов

|                                                        |                          |             |   |
|--------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|---|
| <i>Церий (<math>Ce^{3+}</math>, <math>4f^1</math>)</i> |                          |             |   |
| $LaF_3$<br>YLF                                         | $5d \rightarrow 4f$ [18] | ~0,285      | — |
|                                                        | $5d \rightarrow 4f$ [19] | 0,309—0,325 | — |

| Кристалл                                                          | Лазерный переход                   | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|
| <i>Празеодин (<math>\text{Pr}^{3+}</math>, <math>4f^2</math>)</i> |                                    |                            |                |
| $\text{Ca}(\text{NbO}_3)_2$                                       | $^1G_4 \rightarrow ^3H_4$          | 1,04                       | 77             |
| $\text{CaWO}_4$                                                   | $^1G_4 \rightarrow ^3H_4$          | 1,0468                     | 20—90          |
| $\text{LaBr}_3$                                                   | $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$          | 0,532                      | —              |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$          | 0,621                      | —              |
|                                                                   | $^3P_2 \rightarrow ^3F_3$          | 0,632                      | —              |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$          | 0,647                      | —              |
| $\text{LaF}_3$                                                    | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$          | 0,5985                     | 77             |
| $\text{LaCl}_3$                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_4$          | 0,4892                     | 5,5—14         |
|                                                                   | $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$          | 0,5298                     | 35             |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$          | 0,6164                     | 65             |
|                                                                   |                                    | 0,619                      | —              |
| $\text{LiYF}_4$                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$          | 0,6452                     | 300            |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_4$          | 0,479                      | 300            |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_5$ [20]     | 0,5378                     | 110            |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$ [20]     | 0,6071                     | 110            |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$          | 0,6395                     | 300            |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3F_3$          | 0,6954                     | 110            |
| $\text{PrBr}_3$                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3F_4$          | 0,7190                     | 110            |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$          | 0,622                      | —              |
| $\text{PrCl}_3$                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$          | 0,649                      | 300            |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_4$          | 0,489                      | 5,5—14         |
|                                                                   | $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$          | 0,531                      | 12             |
|                                                                   |                                    | 0,617                      | 65             |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$          | 0,620                      | —              |
| $\text{PrF}_3$                                                    | $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$          | 0,647                      | 300            |
| $\text{SrMoO}_4$                                                  | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$ [22]     | 0,5980                     | 16             |
| $\text{YAlO}_3$                                                   | $^1G_4 \rightarrow ^3H_4$          | 1,04                       | —              |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$ [23]     | 0,6139                     | 110—250        |
|                                                                   | $^3P_0 \rightarrow ^3F_3$ [23]     | 0,7195                     | 110—250        |
| <i>Неодим (<math>\text{Nd}^{3+}</math>, <math>4f^3</math>)</i>    |                                    |                            |                |
| $\text{Ba}_{0,75}\text{Ca}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$           | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,062                      | 295            |
| $\text{BaF}_2$                                                    | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,060                      | 77             |
| $\text{BaF}_2 - \text{LaF}_3$                                     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,534                      | 300            |
|                                                                   |                                    | 1,0538                     | 77             |
|                                                                   |                                    | 1,0580                     | —              |
|                                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,054                      | 300            |
|                                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3185                     | 300            |
|                                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3280                     | 300            |
|                                                                   |                                    | 1,3290                     | 77             |
| $\text{BaF}_2 - \text{CeF}_3$                                     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,054                      | 300            |
| $\text{BaF}_2 - \text{GF}_3$                                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0526                     | 300            |
| $\text{BaF}_2 - \text{YF}_3$                                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0521                     | 300            |
|                                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,32                       | 300            |
| $\text{Ba}_2\text{MgGe}_2\text{O}_7$                              | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0544                     | 300            |

| Кристалл                               | Лазерный переход                   | Длина волны<br>генерации, мкм | Температура,<br>К |
|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| $Ba_{0,25}Mg_{2,75}Y_2Ge_3O_{12}$      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0615                        | 300               |
| $Ba_2NaNb_5O_{15}$ (    c )            | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0613                        | 300               |
| $Ba_2ZnGe_2O_7$ (    c )               | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0544                        | 300               |
| $Bi_4Ge_3O_{12}$                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,06425                       | 77                |
|                                        |                                    | 1,0644                        | 300               |
|                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3418                        | 300               |
| $CaAl_4O_7$                            | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0786                        | 300               |
|                                        |                                    | 1,05895                       | 77                |
|                                        |                                    | 1,06585                       | —                 |
|                                        |                                    | 1,07655                       | 77                |
|                                        |                                    | 1,0772                        | —                 |
|                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3420                        | 300               |
|                                        |                                    | 1,3710                        | —                 |
|                                        |                                    | 1,3400                        | 77                |
|                                        |                                    | 1,3675                        | —                 |
| $CaAl_{12}O_{19}$                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0497                        | 300               |
| $CaF_2$                                | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0457                        | 77                |
| $CaF_2$ (I)                            | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0461                        | 300               |
|                                        |                                    | 1,0457                        | 50                |
|                                        |                                    | 1,0467                        | —                 |
|                                        |                                    | 1,0448                        | 50                |
|                                        |                                    | 1,0508                        | —                 |
|                                        |                                    | 1,0650                        | 50                |
|                                        |                                    | 1,0481                        | —                 |
|                                        |                                    | 1,0448                        | 120               |
|                                        |                                    | 1,0661                        | —                 |
| $CaF_2$ (II)                           | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0885                        | 300               |
| $CaF_2 - CeF_3$                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0654                        | 300               |
|                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3185                        | 300               |
| $CaF_2 - GdF_3$                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0654                        | 300               |
|                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3185                        | 300               |
| $CaF_2 - CeO_2$                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0885                        | 300               |
| $CaF_2 - LaF_3$                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0645                        | 300               |
|                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3190                        | 300               |
| $CaF_2 - SrF_2$                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0369                        | 300               |
| $CaF_2 - SrF_2 - BaF_2 - YF_3 - LaF_3$ | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0535                        | 300               |
| $CaF_2 - YF_3$                         | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0461                        | 300               |
|                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0540                        | 300               |
|                                        |                                    | 1,0632                        | —                 |
|                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3255                        | 77                |
|                                        |                                    | 1,3380                        | —                 |
|                                        |                                    | 1,3600                        | 77                |



| Кристалл                                                                                                                                                                                                                                                              | Лазерный переход                                                                                                                                                                                       | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|
| CaF <sub>2</sub> — YF <sub>3</sub> — NdF <sub>3</sub><br>Ca <sub>4</sub> La (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O<br>CaLa <sub>4</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O<br>Ca Gd <sub>4</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O<br>Ca (NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$             | 1,3270                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3370                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3585                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0632                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0613                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0610                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | ~1,06                      | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,06                       | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0612                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0615                     | 300            |
| CaMoO <sub>4</sub><br><br>Ca (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F (    a)<br>Ca (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F (    c)<br><br>Ca (NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br><br>CaSc <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                                             | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br><br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$<br><br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$<br><br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^3I_{11/2}$ | 1,061                      | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,067                      | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0630                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3347                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3345                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3380                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3425                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0720                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0755                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0868                     | 300            |
| Ca <sub>3</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub><br>CaWO <sub>4</sub><br>CaWO <sub>4</sub> (Na <sup>+</sup> )                                                                                                                                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$<br><br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                | 1,0730                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0867                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3565                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3870                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,067                      | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 0,9145                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0582                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0652                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0649                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0587                     | 77             |
| CaWO <sub>4</sub> (Nb <sup>5+</sup> )<br><br><br><br>CaWO <sub>4</sub> (    c, Na <sup>+</sup> )<br><br><br>CaWO <sub>4</sub> (⊥ c, Na <sup>+</sup> )                                                                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br><br><br><br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$<br><br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                                                                         | 1,0601                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0649                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0650                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,0634                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3340                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3475                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3310                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3459                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3370                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3390                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3345                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3372                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3459                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        | 1,3880                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                        |                            |                |

| Кристалл                                          | Лазерный переход                   | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|
| $\text{Ca}_2\text{Y}_5\text{F}_{19}$              | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0498                     | 300            |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3200                     | 77             |
|                                                   |                                    | 1,3190                     | 300            |
|                                                   |                                    | 1,3525                     | —              |
| $\text{CaY}_2\text{Mg}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,05896                    | 300            |
| $\text{CaY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$            | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0672                     | 300            |
| $\text{CdF}_3 - \text{CaF}_2$ [24]                | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0495                     | 300            |
| $\text{CdF}_2 - \text{YF}_3$                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0651                     | 300            |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3245                     | 300            |
| $\text{CeCl}_3$ (   a)                            | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0647                     | 300            |
| $\text{CeF}_3$                                    | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0410                     | 77             |
|                                                   |                                    | 1,0638                     | 90             |
|                                                   |                                    | 1,0404                     | 300            |
|                                                   |                                    | 1,0639                     | —              |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3320                     | 300            |
|                                                   |                                    | 1,3240                     | 77             |
|                                                   |                                    | 1,3310                     | 77             |
|                                                   |                                    | 1,3675                     | —              |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,051                      | 300            |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0760                     | 300            |
| $\text{GdCa}_5\text{O}_{12}$                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0621                     | 300            |
|                                                   |                                    | 1,0584                     | 77             |
|                                                   |                                    | 1,0599                     | —              |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3307                     | —              |
|                                                   |                                    | 1,3315                     | —              |
| $\text{Gd}(\text{MoO}_4)_3$                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | ~1,06                      | 135            |
|                                                   |                                    | 1,0701                     | 300            |
|                                                   |                                    | 1,0606                     | —              |
|                                                   |                                    | 1,0789                     | 300            |
| $\text{GdO}_3$                                    | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0741                     | —              |
|                                                   |                                    | 1,0789                     | 77             |
|                                                   |                                    | 1,0776                     | —              |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,051                      | 300            |
| $\text{GdP}_5\text{O}_{14}$                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,08515                    | 300            |
| $\text{GdScO}_3$                                  | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,05995                    | 300            |
| $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$  | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,05915                    | 77             |
|                                                   |                                    | 1,0520                     | 300            |
|                                                   |                                    | 1,0660                     | —              |
|                                                   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0604                     | 300            |
| $\text{HfO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$             | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0660                     | 300            |
| $\text{K}_5\text{Bi}(\text{MoO}_4)_4$             | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0672                     | 300            |
| $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (   [010])            | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0585                     | 77             |
| $\text{KLa}(\text{MoO}_4)_2$                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0587                     | 300            |

| Кристалл                                               | Лазерный переход                   | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|
| KLu (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [25]               | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0714                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3482                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0669                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3485                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  | 0,9137                     | 77             |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0688                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3525                     | 300            |
|                                                        |                                    | 1,3545                     | —              |
|                                                        |                                    | 1,3515                     | 77             |
|                                                        |                                    | 1,048                      | 77             |
| K <sub>5</sub> NdLi <sub>2</sub> F <sub>10</sub> [26]  | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,052                      | 300            |
|                                                        |                                    | 1,052                      | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,06                       | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,06                       | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0660                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0804                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0698                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,079                      | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3510                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0407                     | 300            |
| LaF <sub>3</sub> ( $\widehat{cF} \approx 20^\circ$ )   |                                    | 1,0633                     | —              |
|                                                        |                                    | 1,0403                     | 77             |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3675                     | 300            |
|                                                        |                                    | 1,3235                     | 77             |
|                                                        |                                    | 1,3670                     | —              |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3310                     | 300            |
|                                                        |                                    | 1,3125                     | 77             |
|                                                        |                                    | 1,3305                     | —              |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0486                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,0635                     | —              |
| LaF <sub>3</sub> — SrF <sub>2</sub>                    |                                    | 1,3315                     | 300            |
|                                                        |                                    | 1,0640                     | 300            |
|                                                        |                                    | 1,0670                     | —              |
|                                                        |                                    | 1,0675                     | 77             |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3730                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0624                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,079                      | 77             |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,075                      | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0552                     | 300            |
|                                                        |                                    | 1,0817                     | —              |
| La <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> SiO <sub>14</sub> [27] | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,3760                     | 300            |
|                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0599                     | 300            |
| LaNbO <sub>4</sub>                                     |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
| La <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S                       |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
| LaMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub> [28]              |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
| LiGd (MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   c)           |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |
|                                                        |                                    |                            |                |

| Кристалл                                                        | Лазерный переход                   | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|
| LiLa (MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (    c )                  | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0585                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0658                     | 77             |
|                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3370                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,3375                     | 77             |
|                                                                 |                                    | 1,0846                     | 300            |
| LiNbO <sub>3</sub> ( ⊥ c )                                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0933                     | 300            |
| LiNbO <sub>3</sub> (    c )                                     |                                    | 1,3870                     | 300            |
| LiNbO <sub>3</sub> (    c )                                     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3745                     | 300            |
| LiNbO <sub>3</sub> ( ⊥ c )                                      |                                    | 1,0477                     | 300            |
| LiNdP <sub>4</sub> O <sub>12</sub> (    a )                     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0477                     | 300            |
| Li (Nd, La) P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                      |                                    | 1,0477                     | 300            |
| Li (Nd, Gd) P <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0477                     | 300            |
| LiYF <sub>4</sub>                                               |                                    | 1,0530                     | 300            |
| LuAlO <sub>3</sub> (    [112] )                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,047                      | —              |
|                                                                 |                                    | 1,0671                     | 77             |
|                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,0831                     | 120            |
|                                                                 |                                    | 1,0675                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0759                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0832                     | —              |
|                                                                 |                                    | 1,3437                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 0,9473                     | 77             |
|                                                                 |                                    | 1,06425                    | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0605                     | 77             |
| Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3382                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,3532                     | —              |
|                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,3525                     | 77             |
|                                                                 |                                    | 1,0785                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0609                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0623                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0587                     | 77             |
|                                                                 |                                    | 1,06025                    | —              |
|                                                                 |                                    | 1,0616                     | 77             |
|                                                                 |                                    | 1,3315                     | 300            |
| Lu <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> O <sub>12</sub> | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,0599                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0591                     | 77             |
|                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,3360                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0653                     | 300            |
| α-NaCaCeF <sub>6</sub>                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3190                     | 300            |
|                                                                 |                                    | 1,0539                     | 300            |
|                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,069                      | —              |
|                                                                 |                                    | 1,3285                     | 300            |
| α-NaCaYF <sub>6</sub>                                           | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3375                     | —              |
|                                                                 |                                    | 1,3600                     | 300            |
|                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ |                            |                |

| Кристалл                                                                                                                 | Лазерный переход                                                                                                                                     | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|
| 5NaF · 9YF <sub>3</sub>                                                                                                  | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0506                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,0595                     | —              |
| Na <sub>0,5</sub> Gd <sub>0,5</sub> WO <sub>4</sub><br>NaGdGeO <sub>4</sub> [29]                                         | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3070                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,06                       | 77             |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,0615                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3334                     | 300            |
| NaLa (MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                                                                                    | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0595                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,0653                     | —              |
| NaLa (MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ( $\widehat{cF} = 60^\circ$ )                                                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                                                                                                                   | 1,3380                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3440                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3380                     | 77             |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3430                     | —              |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,0635                     | 300            |
| NaLa (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   c)                                                                              | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                                                                             | 1,3355                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,051                      | 300            |
| NaNdP <sub>4</sub> O <sub>12</sub>                                                                                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,05                       | 300            |
| Na <sub>3</sub> Nd (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                                                                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0585                     | —              |
| Na <sub>2</sub> Nd <sub>2</sub> Pb <sub>6</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub> [30]                     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0685                     | —              |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,063                      | 300            |
| Na <sub>5</sub> Nd (WO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub>                                                                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0635                     | 300            |
| NdAl <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>                                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,063                      | —              |
| Nd <sub>x</sub> Gd <sub>1-x</sub> (Al <sub>1-y</sub> Cr <sub>y</sub> ) <sub>3</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> [31] | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0511                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,051                      | 300            |
| (NdLa) P <sub>5</sub> O <sub>14</sub>                                                                                    | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,051                      | 300            |
| (NdSc) P <sub>5</sub> O <sub>14</sub>                                                                                    | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0789                     | 77             |
| (NdIn) P <sub>5</sub> O <sub>14</sub>                                                                                    | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0799                     | 300            |
| Pb <sub>5</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>11</sub> [32]                                                                     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0586                     | 295            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3340                     | 300            |
| PbMoO <sub>4</sub>                                                                                                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,3320                     | 77             |
| PbMoO <sub>4</sub> (⊥ c)                                                                                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                                                                                                                   | 1,0551                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,0576                     | 300            |
| Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F                                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0828                     | —              |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,0566                     | 77             |
| SrAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub>                                                                                         | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0568                     | —              |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,0627                     | 77             |
|                                                                                                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                                                                                                                   | 1,3345                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3665                     | —              |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3320                     | 77             |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,3530                     | —              |
| SrAl <sub>12</sub> O <sub>19</sub>                                                                                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0491                     | 300            |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,037                      | 295            |
| SrF <sub>2</sub>                                                                                                         | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                                                                                                   | 1,0437                     | 77             |
|                                                                                                                          |                                                                                                                                                      | 1,044                      | —              |

| Кристаллы                                                | Лазерный переход                   | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|
| SrF <sub>2</sub> — CeF <sub>3</sub>                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0590                     | 300            |
|                                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3255                     | 300            |
| SrF <sub>2</sub> — GdF <sub>3</sub>                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0528                     | 300            |
|                                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3260                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,3250                     | 77             |
|                                                          |                                    |                            |                |
| SrF <sub>2</sub> — CeF <sub>3</sub> — GdF <sub>3</sub>   | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0589                     | 300            |
| SrF <sub>2</sub> — LaF <sub>3</sub>                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0597                     | 300            |
|                                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3250                     | 300            |
| SrF <sub>2</sub> — LuF <sub>3</sub>                      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0556                     | 300            |
|                                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3200                     | 300            |
| SrF <sub>2</sub> — YF <sub>3</sub> (10%)                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0567                     | 300            |
| SrLa <sub>4</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Ⓞ     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0586                     | 300            |
| SrF <sub>2</sub> — YF <sub>3</sub>                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3225                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,3300                     | —              |
|                                                          |                                    | 1,3320                     | 77             |
|                                                          |                                    |                            |                |
| SrMoO <sub>4</sub>                                       | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0643                     | 295            |
|                                                          |                                    | 1,0576                     | 295            |
|                                                          |                                    | 1,0640                     | 77             |
|                                                          |                                    | 1,0652                     | —              |
|                                                          |                                    | 1,059                      | 77             |
|                                                          |                                    | 1,0627                     | —              |
|                                                          |                                    | 1,0611                     | 77             |
|                                                          |                                    | 1,0585                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,0493                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,3190                     | 300            |
| Sr <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F (   a) | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0796                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,0644                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,06405                    | 77             |
|                                                          |                                    | 1,07225                    | —              |
|                                                          |                                    | 1,0842                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,0913                     | 530            |
| Sr <sub>2</sub> Y <sub>5</sub> F <sub>19</sub>           | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3393                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,3413                     | —              |
|                                                          |                                    | 1,3391                     | 77             |
| YAlO <sub>3</sub> (   [112])                             | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,3514                     | —              |
|                                                          |                                    | 1,0645                     | 295            |
|                                                          |                                    | 1,0725                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,0795                     | —              |
| YAlO <sub>3</sub> (   c)                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,0909                     | 300            |
|                                                          |                                    | 1,0989                     | —              |
|                                                          |                                    | 1,3391                     | 300            |
| YAlO <sub>3</sub> (   b)                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,3411                     | —              |
|                                                          |                                    |                            |                |
| YAlO <sub>3</sub> :Cr <sup>3+</sup> (0,3%)               | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ |                            |                |
|                                                          |                                    |                            |                |
|                                                          |                                    |                            |                |
|                                                          |                                    |                            |                |

| Кристалл                        | Лазерный переход                   | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|
| $Y_3Al_5O_{12}$                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  | 0,891                      | 300            |
|                                 |                                    | 0,900                      | —              |
|                                 |                                    | 0,939                      | 300            |
|                                 |                                    | 0,946                      | —              |
|                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0610                     | 77             |
|                                 |                                    | 1,0612                     | —              |
|                                 |                                    | 1,0519                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,0642                     | —              |
|                                 |                                    | 1,0613                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,0640                     | —              |
|                                 |                                    | 1,0736                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,1119                     | —              |
|                                 |                                    | 1,1158                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,1225                     | —              |
|                                 |                                    | 1,0615                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,0682                     | —              |
|                                 |                                    | 1,0779                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,06415                    | —              |
|                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,3187                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,3335                     | —              |
|                                 |                                    | 1,319                      | 300            |
|                                 |                                    | 1,318                      | —              |
|                                 |                                    | 1,338                      | 300            |
|                                 |                                    | 1,358                      | —              |
| $Y_3Al_5O_{12} : Cr^{3+} (1\%)$ | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,833                      | 233            |
|                                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0612                     | 77             |
|                                 |                                    | 1,0641                     | 300            |
| $Y_3Ca_5O_{12}$                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0633                     | 300            |
| $Y_2O_3$                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,073                      | 77             |
|                                 |                                    | 1,078                      | 77             |
| $Y_2O_3 - ThO_2 - Nd_2O_3$      | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,074                      | 300            |
| $Y_3Ga_5O_{12}$                 | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0589                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,0603                     | —              |
|                                 |                                    | 1,06205                    | 300            |
|                                 |                                    | 1,0583                     | 77             |
|                                 |                                    | 1,05975                    | 77             |
| $YPrO_{14}$                     | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0614                     | —              |
|                                 |                                    | 1,0525                     | 300            |
| $(Y, Lu)_3Al_5O_{12}$           | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,0515                     | —              |
|                                 |                                    | 1,0642                     | 300            |
|                                 |                                    | 1,0608                     | 77             |
|                                 |                                    | 1,0636                     | 77             |
|                                 |                                    | 1,0726                     | —              |

| Кристалл                                                                 | Лазерный переход                                                         | Длина волны генерации, мкм                    | Температура, К |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|
| Y <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub>           | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                       | 1,0575                                        | 77             |
|                                                                          |                                                                          | 1,0583                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,0615                                        | 300            |
| YScO <sub>3</sub>                                                        | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ | 1,3585                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,0843                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,0770                                        | 77             |
| Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>                                          | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                                       | 1,0715                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,0742                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,0782                                        | —              |
|                                                                          |                                                                          | 1,0710                                        | 77             |
|                                                                          |                                                                          | 1,0781                                        | —              |
|                                                                          |                                                                          | 1,3585                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,3580                                        | 77             |
| YVO <sub>4</sub>                                                         | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,069                                         | ~90            |
|                                                                          |                                                                          | 1,0641                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,0664                                        | —              |
|                                                                          |                                                                          | 1,3415                                        | 77             |
|                                                                          |                                                                          | 1,3425                                        | 300            |
| ZrO <sub>2</sub> — Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$<br>$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 1,0608                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | 1,3320                                        | 300            |
|                                                                          |                                                                          | Самарий (Sm <sup>3+</sup> , 4f <sup>5</sup> ) |                |
| TbF <sub>3</sub> [33]                                                    | $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{7/2}$                                        | 0,5932                                        | 116            |
| Европий (Eu <sup>3+</sup> , 4f <sup>6</sup> )                            |                                                                          |                                               |                |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                            | $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$                                                | 0,6113                                        | 220            |
| YVO <sub>4</sub>                                                         | $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$                                                | 0,6193                                        | 90             |
| Тербий (Tb <sup>3+</sup> , 4f <sup>8</sup> )                             |                                                                          |                                               |                |
| LiYF <sub>4</sub> :Gd <sup>3+</sup> (10%)                                | $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$                                                | 0,5445                                        | 300            |
| Диспрозий (Dy <sup>3+</sup> , 4f <sup>9</sup> )                          |                                                                          |                                               |                |
| Ba (Y <sub>1,26</sub> Er <sub>0,7</sub> ) F <sub>8</sub>                 | $^6H_{13/2} \rightarrow ^6H_{15/2}$                                      | 3,022                                         | 77             |
| Гольмий (Ho <sup>3+</sup> , 4f <sup>10</sup> )                           |                                                                          |                                               |                |
| Ba (Y, Yb) <sub>2</sub> F <sub>8</sub>                                   | $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$                                                | 0,5515                                        | 77             |
| Ba (Y <sub>1,8</sub> Ho <sub>0,2</sub> ) F <sub>8</sub>                  | $^5F_5 \rightarrow ^5I_5$                                                | 2,362                                         | 77             |
|                                                                          |                                                                          | 2,375                                         | 77             |
|                                                                          |                                                                          | 2,363                                         | 20             |
|                                                                          |                                                                          | 2,377                                         | —              |
|                                                                          |                                                                          | 2,71                                          | 295            |
| BaY <sub>1,64</sub> Er <sub>0,03</sub> Tm <sub>0,03</sub> F <sub>8</sub> | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                                                | 2,065                                         | 77             |
|                                                                          |                                                                          | 2,0746                                        | 77             |
|                                                                          |                                                                          | 2,0866                                        | —              |
|                                                                          |                                                                          | 2,0555                                        | 20             |
|                                                                          |                                                                          | 2,074                                         | —              |
|                                                                          |                                                                          |                                               |                |
| BaYb <sub>2</sub> F <sub>8</sub> [34]                                    | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                                                | 2,0895                                        | 300            |
| Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> [35]                     | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                                                | 2,087                                         | 77             |



| Кристалл                                                                                                | Лазерный переход          | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|
| CaF <sub>2</sub>                                                                                        | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,092                      | 77             |
| CaF <sub>2</sub> :ErF <sub>3</sub> (3%), YbF <sub>3</sub> (3%), TmF <sub>3</sub> (3%)                   | $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ | 0,55122                    | 77             |
|                                                                                                         | $^5S_2 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1                        | 77             |
| CaF <sub>2</sub> — ErF <sub>3</sub>                                                                     | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0600                     | 77             |
| CaF <sub>2</sub> — YF <sub>3</sub>                                                                      | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0318                     | 90             |
| CaF <sub>2</sub> — YF <sub>3</sub> : (Er <sup>3+</sup> , Tm <sup>3+</sup> , Yb <sup>3+</sup> )          | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,05                       | 100            |
|                                                                                                         |                           | 2,06                       | 298            |
| CaMoO <sub>4</sub> : Er <sup>3+</sup> (0,75%)                                                           | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0740                     | 77             |
|                                                                                                         |                           | 0,0707                     | 77             |
|                                                                                                         |                           | 2,0556                     | —              |
| Ca (NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                                                     | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,047                      | 77             |
| Ca (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F : Cr <sup>3+</sup> (0,3%)                                          | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,079                      | 77             |
| CaWO <sub>4</sub>                                                                                       | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,046                      | 77             |
| CaY <sub>4</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O : Er <sup>3+</sup> (37,5%) Tm <sup>3+</sup> (3,75%) | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,059                      | 77             |
| Cd <sub>3</sub> Ga <sub>2</sub> O <sub>12</sub> [36]                                                    | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,060                      | 77             |
| ErAlO <sub>3</sub>                                                                                      | $^5I_6 \rightarrow ^5I_8$ | 1,2085                     | 110            |
| (Er, Lu) AlO <sub>3</sub>                                                                               | $^5S_2 \rightarrow ^5I_5$ | 1,4040                     | 110            |
| Er <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> [34]                                                    | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1205                     | 77             |
| Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                          | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0010                     | 77             |
| Er <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> O <sub>12</sub> : Tm <sup>3+</sup>                      | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0985                     | 77             |
| Er <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>                                                                        | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,121                      | 145            |
| (Er, Tm, Yb) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                                               | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0985                     | 110            |
| Er <sub>1,5</sub> Y <sub>1,5</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                                      | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,085                      | 77             |
|                                                                                                         |                           | 2,1010                     | 77             |
|                                                                                                         |                           | 2,0979                     | 77             |
|                                                                                                         |                           | 2,0917                     | —              |
|                                                                                                         |                           | ~2,123                     | 77             |
| GdAlO <sub>3</sub>                                                                                      | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 1,9925                     | 90             |
| Ho <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                                                         | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1294                     | 90             |
|                                                                                                         |                           | 2,1224                     | 77             |
|                                                                                                         |                           | 2,097                      | —              |
| HoF <sub>3</sub>                                                                                        | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,090                      | 77             |
| Ho <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                                                         | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1135                     | 77             |
|                                                                                                         |                           | 2,086                      | 77             |
| (Ho, Lu) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> [37]                                              | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1005                     | 110            |
|                                                                                                         |                           | 2,1250                     | —              |
|                                                                                                         |                           | 2,1300                     | 110            |
| Ho <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> O <sub>12</sub>                                         | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1170                     | 77             |
|                                                                                                         |                           | 2,1285                     | —              |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [37]                                                                | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0740                     | 110            |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [36]                                                                | $^5S_2 \rightarrow ^5I_5$ | 1,3982                     | 110            |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   b)                                                              | $^5I_6 \rightarrow ^5I_7$ | 2,9342                     | 300            |
| KY (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [36]                                                                 | $^5S_2 \rightarrow ^5I_5$ | 1,3908                     | 110            |
|                                                                                                         | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0765                     | 110            |
| KY (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> : Er <sup>3+</sup> , Tm <sup>3+</sup>                                | $^5I_7 \rightarrow ^5I_7$ | 2,0720                     | ~300           |
| KLu (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [37]                                                                | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0790                     | 110            |
| LaNbO <sub>4</sub> [37]                                                                                 | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0725                     | 110            |
| LaNbO <sub>4</sub> : Er <sup>3+</sup>                                                                   | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,07                       | 90             |
| LiHoF <sub>4</sub>                                                                                      | $^5F_5 \rightarrow ^5I_7$ | 0,979                      | 90             |
| LiNbO <sub>3</sub>                                                                                      | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0786                     | 77             |
| LiYF <sub>4</sub>                                                                                       | $^5S_2 \rightarrow ^5I_7$ | 0,7498                     | 90             |
|                                                                                                         | $^5F_5 \rightarrow ^5I_7$ | 0,9794                     | 90             |
|                                                                                                         | $^5S_2 \rightarrow ^5I_6$ | 1,0143                     | 90             |
|                                                                                                         | $^5S_2 \rightarrow ^5I_5$ | 1,3960                     | 300            |
|                                                                                                         | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,0672                     | 90             |
| LuAlO <sub>3</sub>                                                                                      | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1348                     | 90             |
| Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                                                         | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1020                     | 77             |
| Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : Cr <sup>3+</sup> [38]                                 | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1020                     | 110            |
| Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : Er <sup>3+</sup> (2%), Tm <sup>3+</sup> (2%)          | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,1020                     | 77             |
|                                                                                                         | $^5I_6 \rightarrow ^5I_7$ | 2,9460                     | 300            |

| Кристалл                                                                             | Лазерный переход                                       | Длина волны генерации, мкм                   | Температура, К           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|
| $\alpha\text{-NaCaErF}_6$                                                            | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,0345<br>2,0312<br>2,0377                   | 150<br>77<br>—           |
| $\text{LiY}_{0,5-x-y}\text{Er}_{0,5}\text{Tm}_x\text{Ho}_y\text{F}_4$ [39]           | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,06                                         | —                        |
| $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Er}^{3+}$                                       | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,050                                        | 90                       |
| $\text{YAlO}_3$ [37]                                                                 | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,1185<br>2,13                               | 110<br>110               |
| $\text{YAlO}_3$ (    [112])                                                          | $^5I_6 \rightarrow ^5I_7$                              | 2,9180<br>2,0132                             | 300<br>300               |
| $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$                                                 | $^5I_6 \rightarrow ^5I_7$<br>$^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ | 2,9403<br>2,0914<br>2,0975                   | 300<br>77<br>—           |
| $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Cr}^{3+}$ (0,5%)                         |                                                        | 2,1223<br>2,0975                             | 77<br>77                 |
| $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Er}^{3+}$ (50%), $\text{Tm}^{3+}$ (6,7%) |                                                        | 2,1223<br>2,0982<br>2,1227<br>2,1288<br>2,13 | —<br>77<br>—<br>295<br>— |
| $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ [34]                                           | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,0995                                       | —                        |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$                                                 | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,086                                        | 77                       |
| $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12} : \text{Er}^{3+}$ (5%), $\text{Tm}^{3+}$ (5%)    | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,089<br>2,107<br>2,086<br>2,114             | 77<br>77<br>77<br>—      |
| $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$                                                 | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,086<br>2,114                               | 77<br>—                  |
| $\text{YVO}_4 : \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$                                      | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,0412                                       | 77                       |
| $\text{ZrO}_2 - \text{Er}_2\text{O}_3$                                               | $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$                              | 2,115                                        | 77                       |
| <b>Эрбий (<math>\text{Er}^{3+}</math>, <math>4f^{11}</math>)</b>                     |                                                        |                                              |                          |
| $\text{BaY}_2\text{F}_8$                                                             | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$                     | 0,5540                                       | 77                       |
|                                                                                      | $^4H_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                     | 0,5617                                       | 77                       |
|                                                                                      | $^4H_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                     | 0,7037                                       | 77                       |
| $\text{BaY}_2\text{F}_8 : \text{Yb}^{3+}$ (37,5%)                                    | $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$                     | 0,6709<br>0,6700                             | 77<br>—                  |
| $\text{BaEr}_2\text{F}_8$ [40]                                                       | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$                      | 1,6455<br>1,7355                             | 110<br>—                 |
|                                                                                      | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                     | 1,2320                                       | 110                      |
|                                                                                      | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                     | 0,8425<br>0,8543                             | 110<br>—                 |
|                                                                                      | $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                     | 1,9975                                       | 110                      |
|                                                                                      | $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$                     | 0,6700                                       | 110                      |
|                                                                                      | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                    | 2,7417<br>2,7595                             | 110<br>—                 |
|                                                                                      |                                                        | 2,7980                                       | 110                      |
| $\text{BaYb}_2\text{F}_8$ [41]                                                       | $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$                     | 1,9654                                       | 300                      |
|                                                                                      | $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                     | 1,26                                         | 300                      |
| $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ [35]                                           | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$                     | 0,853                                        | 77                       |
|                                                                                      | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$                    | 1,558<br>1,664                               | 77<br>—                  |
| $\text{CaAl}_4\text{O}_7$                                                            | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$                    | 1,5500<br>1,5815                             | 77<br>—                  |

| Кристалл                                                                | Лазерный переход                    | Длина волны<br>генерации, мкм | Температу-<br>ра, К |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| CaF <sub>2</sub>                                                        | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,617                         | 77                  |
|                                                                         |                                     | 1,5298                        | 4                   |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,8456                        | 77                  |
|                                                                         |                                     | 0,8548                        | 77                  |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  | 1,26                          | 77                  |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,696                         | 77                  |
| CaF <sub>2</sub> — ErF <sub>3</sub> [42]                                |                                     | 1,715                         | —                   |
|                                                                         |                                     | 1,726                         | 77                  |
|                                                                         | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,7295                        | 300                 |
|                                                                         |                                     | 2,7460                        | —                   |
|                                                                         |                                     | 2,7490                        | 300                 |
|                                                                         |                                     | 2,7955                        | —                   |
| CaF <sub>2</sub> — ErF <sub>3</sub>                                     |                                     | 2,7985                        | 300                 |
| CaF <sub>2</sub> — ErF <sub>3</sub> : TmF <sub>3</sub> (0,5%)           | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,7307                        | 300                 |
| CaF <sub>2</sub> — YF <sub>3</sub>                                      | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,69                          | 298                 |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,8430                        | 77                  |
|                                                                         | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,5448                        | 77                  |
| Ca (NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                     |                                     | 1,5558                        | —                   |
| CaWO <sub>4</sub>                                                       | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,61                          | 77                  |
| CdAlO <sub>3</sub> [43]                                                 | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,612                         | 77                  |
| Er <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> [44]                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,6571                        | 77                  |
| Er <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7762                        | 110                 |
| ErAlO <sub>3</sub> [44]                                                 | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,9370                        | 300                 |
| (Er, Lu) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                   | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,6632                        | 110                 |
| Er <sub>1,5</sub> Lu <sub>1,5</sub> AlO <sub>3</sub>                    | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,9395                        | 300                 |
| KEr (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [45]                                | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,6631                        | 110                 |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   c)                              | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,8070                        | 300                 |
|                                                                         | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,7222                        | 300                 |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   b)                              |                                     | 2,7990                        | —                   |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   c)                              | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,7990                        | 300                 |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   b)                              | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,8468                        | 300                 |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   c)                              | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,8468                        | 300                 |
| KGd (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (   b)                              | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7155                        | 300                 |
| KLu <sub>1-x</sub> Er <sub>x</sub> (WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [46] | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7325                        | 300                 |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7383                        | 300                 |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,85                          | 300                 |
|                                                                         | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,8092                        | 300                 |
| LaF <sub>3</sub>                                                        | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,6113                        | 300                 |
| LiErF <sub>4</sub>                                                      | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,732                         | 90                  |
| LiErF <sub>4</sub> [47]                                                 | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7042                        | 110                 |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  | 1,2288                        | 110                 |
|                                                                         | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,8540                        | 110                 |

| Кристалл                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Лазерный переход                    | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------|
| LiYF <sub>4</sub><br>LuAlO <sub>3</sub> (    [112])<br>Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  | 2,0005                     | 110            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 2,8500                     | 110            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,8500                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,6675                     | 90             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,86325                    | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 0,8632                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,6525                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 1,6630                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7762                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,9406                     | 300            |
| Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : Ho <sup>3+</sup> , Tm <sup>3+</sup><br>SrF <sub>2</sub> — ErF <sub>3</sub> [48]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                     | 2,8298                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,6990                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,7285                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 2,7450                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 2,7930                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,84975                    | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 0,8594                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 0,84965                    | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 0,85165                    | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3,2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,6632                     | 300            |
| YAlO <sub>3</sub> (    [112])                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,7309                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  | 0,86275                    | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 0,86275                    | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,632                      | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7757                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,8302                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 2,9364                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,6602                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 1,6452                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,6459                     | 295            |
| Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub><br>Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ·Yb <sup>3+</sup> (5%)<br>Yb <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub><br>Y <sub>1,5</sub> Er <sub>1,5</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> [49]<br>Y <sub>0,75</sub> Er <sub>0,25</sub> AlO <sub>3</sub> [49]<br>(Y, Er) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (    [100])<br>ZrO <sub>2</sub> — Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (12%) | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,6615                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,7760                     | 110            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$   | 1,6631                     | 110            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ | 2,8302                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 2,9364                     | 300            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ | 1,62                       | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     |                            |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     |                            |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     |                            |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     |                            |                |
| Тулий (Tm <sup>3+</sup> , 4f <sup>12</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                     |                            |                |
| Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> [35]<br>CaF <sub>2</sub> — ErF <sub>3</sub><br>CaMoO <sub>4</sub> :Er <sup>3+</sup> (0,75%)<br>Ca (NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br>CaWO <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                            | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$           | 1,850                      | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$           | 1,894                      | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 1,9                        | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$           | 1,9115                     | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 1,9060                     | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$           | 1,91                       | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$           | 1,911                      | 77             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     | 1,916                      | —              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     |                            |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                     |                            |                |

| Кристалл                                                                | Лазерный переход                  | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------|
| ErAlO <sub>3</sub>                                                      | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,872                      | 77             |
| (Er, Lu) AlO <sub>3</sub>                                               | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8845                     | 77             |
| Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                          | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,934                      | 77             |
| Er <sub>1,5</sub> Y <sub>1,5</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>13</sub>      | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,880                      | 77             |
|                                                                         |                                   | 1,884                      | —              |
|                                                                         |                                   | 2,014                      | 85             |
| GdAlO <sub>3</sub>                                                      | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8529                     | 77             |
| LiNbO <sub>3</sub>                                                      | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8532                     | 77             |
| LiYF <sub>4</sub> [50]                                                  | $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$         | 2,3030                     | 77             |
|                                                                         | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8890                     | 77             |
|                                                                         |                                   | 1,9090                     | —              |
| Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                         | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8855                     | 77             |
|                                                                         |                                   | 2,0240                     | —              |
| Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : Cr <sup>3+</sup> [38] | $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$         | 2,3425                     | 110            |
| $\alpha$ -NaCaErF <sub>6</sub>                                          | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8580                     | 77             |
|                                                                         |                                   | 1,8885                     | —              |
| SrF <sub>2</sub>                                                        | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,972                      | 77             |
| YAlO <sub>3</sub> : Cr <sup>3+</sup> (   [112])                         | $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$         | 2,274                      | 300            |
| YAlO <sub>3</sub> : Cr <sup>3+</sup> (0,75%)                            | $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$         | 2,318                      | 300            |
|                                                                         |                                   | 2,353                      | —              |
|                                                                         |                                   | 2,354                      | 300            |
|                                                                         |                                   | 2,355                      | —              |
|                                                                         |                                   | 2,274                      | 300            |
|                                                                         |                                   | 2,318                      | —              |
| YAlO <sub>3</sub> : Cr <sup>3+</sup> (0,1%)                             | $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$         | 2,34                       | 300            |
| YAlO <sub>3</sub> : Cr <sup>3+</sup> (0,1%)                             | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,856                      | 90             |
|                                                                         |                                   | 1,883                      | —              |
|                                                                         |                                   | 1,9335                     | 90             |
| YAlO <sub>3</sub> (30% Er <sup>3+</sup> )                               | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,861                      | 77             |
| YAlO <sub>3</sub> : Cr <sup>3+</sup> (0,1%)                             | $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$         | 2,348                      | 300            |
|                                                                         |                                   | 2,349                      | —              |
| Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                          | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8834                     | 77             |
|                                                                         |                                   | 2,0132                     | 85             |
| YAl <sub>5</sub> O <sub>12</sub> : Cr <sup>3+</sup> (0,5%)              | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 2,0132                     | 77             |
| YAlO <sub>3</sub> : Cr <sup>3+</sup> (0,01%)                            | $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$         | 2,324                      | 300            |
| (Yb, Er) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                   | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,8850                     | 77             |
|                                                                         |                                   | 2,0195                     | —              |
| YVO <sub>4</sub>                                                        | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 2,019                      | 295            |
| ZrO <sub>2</sub> — Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$         | 1,896                      | 77             |
| Иттербий (Yb <sup>3+</sup> , 4f <sup>13</sup> )                         |                                   |                            |                |
| Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> [35]                    | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,030                      | 77             |
| CaF <sub>2</sub> : Nd <sup>3+</sup> (1 — 2%)                            | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0336                     | ~120           |

| Кристалл                                            | Лазерный переход                  | Длина волны генерации, мкм | Температура, К |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------|
| $Gd_3Ca_5O_{12} : Nd^{3+}$ (~ 2%)                   | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0232                     | 77             |
| $Gd_3Sc_2Al_3O_{12} : Nd^{3+}$ (1,5%)               | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0299                     | 77             |
| $Lu_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ (~ 1%)                   | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0294                     | 77             |
|                                                     |                                   | 1,0297                     | 175            |
| $Lu_3Ga_5O_{12} : Nd^{3+}$ (1,5%)                   | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0230                     | 77             |
| $Lu_3Sc_2Al_3O_{12} : Nd^{3+}$ (1,5%)               | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0299                     | 77             |
| $Y_3Al_5O_{12}$                                     | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0296                     | 77             |
|                                                     |                                   | 1,0293                     | —              |
| $Y_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ (~ 0,8%)                  | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0297                     | 200            |
| $Y_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ (~ 0,8%) $Cr^{3+}$ (0,5%) | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0298                     | 210            |
| $Y_3Ga_5O_{12} : Nd^{3+}$ (1,5%)                    | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0233                     | 77             |
| $(Y, Yb)_3 Al_5O_{12}$                              | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0293                     | 77             |
| $(Yb, Lu)_3 Al_5O_{12}$                             | $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ | 1,0294                     | 77             |

Уран ( $U^{3+}$ ,  $5f^3$ )

|         |                                    |       |            |
|---------|------------------------------------|-------|------------|
| $BaF_2$ | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ | 2,556 | 20         |
| $CaF_2$ | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ | 2,613 | 300        |
|         |                                    | 2,57  | 300        |
|         |                                    | 2,51  | 77         |
|         |                                    | 2,44  | 77         |
|         |                                    | 2,24  | 77         |
| $SrF_2$ | $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ | 2,407 | 90; 77; 20 |

## 34.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ НЕОДИМОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ СТЕКОЛ

Стекло, активированное неодимом, — наиболее распространенный и широко применяемый материал для твердотельных лазеров. Отечественная промышленность и зарубежные фирмы выпускают более 50 марок активированных неодимом стекол.

В табл. 34.4 и 34.5 приведены физико-химические, оптические и спектрально-люминесцентные характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол, выпускаемых в СССР. Все отечественные стекла имеют силикатную или фосфатную основу. Стимулированное излучение связано с переходами между электронными

уровнями активаторного иона  $Nd^{3+}$ . Приведенные в таблицах спектрально-люминесцентные характеристики относятся к переходу  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ .

Одной из наиболее трудно определяемых спектроскопических характеристик лазерных материалов является пиковое сечение генерационного перехода. Разные работы дают противоречивые значения этой величины. В табл. 34.5 приведены сечения переходов, измеренные лазерной методикой в аналогичных условиях [51].

Лазеры на неодимовых стеклах работают в импульсном режиме. Для накачки обычно используются импульсные ксеноновые газоразрядные лампы.

Более подробные сведения о неодимовых лазерных стеклах можно найти в [51—53].

Таблица 34.4. Физико-химические свойства промышленных неодимовых лазерных стекол [51, 52]

| Марка стекла             | Концентрация ионов $Nd^{3+}$ , $10^{20}$ см $^{-3}$ | Плотность, $10^3$ кг/см $^3$ | Теплопроводность, Вт/(м·К) | Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) | Коэффициент линейного расширения, $10^{-7}$ К $^{-1}$ | Модуль Юнга, $10^{13}$ Па | Модуль сдвига, $10^{13}$ Па | Коэффициент Пуассона |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <i>Силикатные стекла</i> |                                                     |                              |                            |                                  |                                                       |                           |                             |                      |
| КГСС 3                   | 2,02                                                | 2,90                         | —                          | —                                | 113                                                   | 6,37                      | 2,16                        | 0,25                 |
| КГСС 5                   | 3,96                                                | 2,93                         | —                          | —                                | 110                                                   | 6,42                      | —                           | 0,25                 |
| КГСС 7                   | 5,93                                                | 2,96                         | —                          | —                                | 105                                                   | 6,50                      | —                           | 0,25                 |
| ЛГС 5                    | 6,03                                                | 3,01                         | —                          | —                                | 102                                                   | —                         | —                           | —                    |
| ЛГС 236                  | 1,83                                                | 2,56                         | 0,62                       | 670                              | 93                                                    | 7,79                      | 3,19                        | 0,22                 |
| ГЛС 1                    | 1,90                                                | 2,66                         | 0,98                       | 710                              | 94                                                    | 7,35                      | 2,99                        | 0,23                 |
| ГЛС 2                    | 1,98                                                | 2,70                         | —                          | —                                | 119                                                   | 6,78                      | —                           | 0,23                 |
| ГЛС 3                    | 5,30                                                | 2,70                         | —                          | —                                | 121                                                   | 6,83                      | —                           | 0,24                 |
| ГЛС 4                    | 4,56                                                | 2,66                         | 0,70                       | 710                              | 112                                                   | 6,93                      | 2,84                        | 0,22                 |
| ГЛС 5                    | 0,97                                                | 2,72                         | 0,49                       | 670                              | 113                                                   | 5,78                      | 2,25                        | 0,27                 |
| ГЛС 6                    | 1,96                                                | 2,74                         | 0,49                       | 670                              | 114                                                   | 5,68                      | 2,25                        | 0,26                 |
| ГЛС 7                    | 3,05                                                | 2,81                         | 0,40                       | 670                              | 113                                                   | 6,17                      | 2,45                        | 0,26                 |
| ГЛС 8                    | 5,16                                                | 2,86                         | —                          | —                                | 108                                                   | 5,98                      | 2,35                        | 0,27                 |
| ГЛС 14                   | 4,56                                                | 2,73                         | 0,70                       | 690                              | 108                                                   | 7,0                       | 2,75                        | 0,23                 |
| ЛГС 59                   | 4,68                                                | 2,62                         | —                          | —                                | 114                                                   | 6,55                      | 2,64                        | 0,23                 |
| <i>Фосфатное стекло</i>  |                                                     |                              |                            |                                  |                                                       |                           |                             |                      |
| ГЛС 21                   | 1,38                                                | 3,49                         | 0,40                       | 570                              | 106                                                   | 5,33                      | 2,06                        | 0,29                 |
| ГЛС 22                   | 2,0                                                 | 3,51                         | 0,40                       | 570                              | 106                                                   | 5,58                      | 2,19                        | 0,28                 |
| ГЛС 23                   | 3,6                                                 | 3,52                         | —                          | —                                | —                                                     | 5,58                      | —                           | 0,28                 |
| ГЛС 24                   | 5,7                                                 | 3,52                         | —                          | —                                | —                                                     | 5,58                      | —                           | 0,28                 |
| ГЛС 25                   | 2,33                                                | 3,35                         | 0,41                       | 670                              | 111                                                   | 5,12                      | —                           | —                    |
| ГЛС 26                   | 3,30                                                | 3,40                         | 0,41                       | 670                              | 102                                                   | 5,12                      | —                           | —                    |
| ГЛС 27                   | 12,7                                                | 3,40                         | 0,44                       | 570                              | 94                                                    | 5,34                      | —                           | 0,29                 |
| ГЛС 32                   | 2,0                                                 | 3,38                         | 0,50                       | —                                | 103                                                   | 5,42                      | —                           | 0,28                 |
| ЛГС 40                   | 2,75                                                | 2,50                         | —                          | —                                | 156                                                   | 5,06                      | 2,0                         | 0,26                 |
| ЛГС 41                   | 3,06                                                | 2,67                         | —                          | —                                | 112                                                   | —                         | —                           | —                    |
| ЛГС 54                   | 2,01                                                | 2,81                         | —                          | —                                | 170                                                   | 4,76                      | 1,86                        | 0,28                 |
| ЛГС 55                   | 1,90                                                | 2,66                         | 0,77                       | 840                              | 127                                                   | 5,82                      | 2,30                        | 0,26                 |
| ЛГС 56                   | 1,93                                                | 2,70                         | 0,56                       | 880                              | 128                                                   | 6,61                      | 2,65                        | 0,25                 |
| ЛГСИ-1                   | 1,33                                                | 3,38                         | 0,42                       | 670                              | 106                                                   | 5,39                      | 2,10                        | 0,29                 |
| ЛГСИ-2                   | 2,33                                                | 3,39                         | 0,42                       | 670                              | 111                                                   | 5,12                      | 1,98                        | 0,31                 |

Таблица 34.5. Оптические и спектрально-люминесцентные характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол [52, 53]

| Марка стекла             | Показатель преломления ( $\lambda = 1,06$ мкм) | Коэффициент дисперсии | Коэффициент Брюстера, $10^{-3}$ им·м/Н | Показатель поглощения ( $\lambda = 1,06$ мкм), $10^{-3}$ см $^{-1}$ | Длина волны максимума люминесценции ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ), мкм | Ширина полосы люминесценции ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ), нм | Время жизни метастабильного состояния, мкс | Сечение генерационного перехода ( ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ), $10^{-20}$ см $^2$ |
|--------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Силикатные стекла</i> |                                                |                       |                                        |                                                                     |                                                                                     |                                                                            |                                            |                                                                                                |
| КГСС 3                   | 1,533                                          | 57,5                  | 2,4                                    | 3—5                                                                 | 1,058                                                                               | —                                                                          | 570                                        | 2,1                                                                                            |
| КГСС 5                   | 1,536                                          | 57,5                  | 2,4                                    | 3—5                                                                 | 1,057                                                                               | —                                                                          | 510                                        | 2,1                                                                                            |
| КГСС 7                   | 1,542                                          | 57,2                  | 2,4                                    | 3—5                                                                 | 1,057                                                                               | —                                                                          | 390                                        | 2,1                                                                                            |
| ЛГС 5                    | 1,543                                          | 55,7                  | —                                      | 3—5                                                                 | —                                                                                   | —                                                                          | 370                                        | 2,0                                                                                            |
| ЛГС 236                  | 1,567                                          | 43,9                  | 2,9                                    | 2—3                                                                 | 1,059                                                                               | —                                                                          | 350                                        | 2,9                                                                                            |
| ГЛС 1                    | 1,523                                          | 57,9                  | 2,7                                    | 1—3                                                                 | 1,058                                                                               | 35                                                                         | 440                                        | 2,4                                                                                            |
| ГЛС 2                    | 1,518                                          | —                     | 2,8                                    | 2                                                                   | —                                                                                   | 29                                                                         | 460                                        | 2,2                                                                                            |
| ГЛС 3                    | 1,518                                          | —                     | 2,8                                    | 2                                                                   | —                                                                                   | —                                                                          | 360                                        | 2,5                                                                                            |
| ГЛС 4                    | 1,516                                          | 57,8                  | —                                      | 1—3                                                                 | 1,058                                                                               | —                                                                          | 480                                        | 2,0                                                                                            |
| ГЛС 5                    | 1,533                                          | 52,4                  | 2,2                                    | 1—3                                                                 | 1,057                                                                               | —                                                                          | 570                                        | 1,6                                                                                            |
| ГЛС 6                    | 1,538                                          | 52,2                  | 2,3                                    | 1—3                                                                 | 1,057                                                                               | 35                                                                         | 500                                        | 1,6                                                                                            |
| ГЛС 7                    | 1,542                                          | 51,2                  | 2,2                                    | 1—3                                                                 | 1,057                                                                               | 35                                                                         | 410                                        | 2,1                                                                                            |
| ГЛС 8                    | 1,548                                          | 50,6                  | 2,2                                    | 1—3                                                                 | 1,057                                                                               | —                                                                          | 290                                        | 2,1                                                                                            |
| ГЛС 14                   | 1,525                                          | 56,9                  | 2,4                                    | 2—5                                                                 | 1,057                                                                               | —                                                                          | 420                                        | 2,0                                                                                            |
| ЛГС 59                   | 1,529                                          | 52,0                  | —                                      | 1—2                                                                 | 1,057                                                                               | —                                                                          | 440                                        | 2,0                                                                                            |
| <i>Фосфатные стекла</i>  |                                                |                       |                                        |                                                                     |                                                                                     |                                                                            |                                            |                                                                                                |
| ГЛС 21                   | 1,582                                          | 58,6                  | 1,1                                    | 1—2                                                                 | 1,055                                                                               | —                                                                          | 340                                        | 3,5                                                                                            |
| ГЛС 22                   | 1,582                                          | 58,7                  | 1,3                                    | 1—2                                                                 | 1,055                                                                               | 28,6                                                                       | 300                                        | 3,5                                                                                            |
| ГЛС 23                   | 1,582                                          | —                     | 1,3                                    | 1—2                                                                 | 1,055                                                                               | —                                                                          | 250                                        | 3,5                                                                                            |
| ГЛС 24                   | 1,582                                          | —                     | 1,3                                    | 1—2                                                                 | 1,055                                                                               | —                                                                          | 210                                        | 3,5                                                                                            |
| ГЛС 25                   | 1,568                                          | 65,3                  | 1,3                                    | 1—2                                                                 | 1,054                                                                               | —                                                                          | 270                                        | 3,0                                                                                            |
| ГЛС 26                   | 1,564                                          | 65,7                  | 1,4                                    | 1—2                                                                 | 1,054                                                                               | —                                                                          | 230                                        | 3,0                                                                                            |
| ГЛС 27                   | 1,568                                          | —                     | 1,4                                    | 1—2                                                                 | 1,054                                                                               | —                                                                          | 90                                         | 3,0                                                                                            |
| ГЛС 32                   | 1,582                                          | 56,5                  | 1,3                                    | 1—2                                                                 | 1,054                                                                               | —                                                                          | 270                                        | 3,2                                                                                            |
| ЛГС 40                   | 1,493                                          | 67,0                  | —                                      | 1—2                                                                 | 1,054                                                                               | 24,0                                                                       | 200                                        | 4,0                                                                                            |
| ЛГС 41                   | 1,506                                          | 69,5                  | —                                      | 1—2                                                                 | 1,054                                                                               | —                                                                          | 230                                        | 2,9                                                                                            |
| ЛГС 54                   | 1,562                                          | 44,8                  | 2,1                                    | 1—2                                                                 | 1,055                                                                               | 26,7                                                                       | 260                                        | 3,9                                                                                            |
| ЛГС 55                   | 1,521                                          | 63,4                  | 2,0                                    | 1—2                                                                 | 1,053                                                                               | 30,0                                                                       | 310                                        | 2,8                                                                                            |
| ЛГС 56                   | 1,532                                          | 63,3                  | 1,9                                    | 1—2                                                                 | 1,054                                                                               | 29,5                                                                       | 300                                        | 3,1                                                                                            |
| ЛГСИ-1                   | 1,565                                          | 65,7                  | 1,3                                    | 1—2                                                                 | —                                                                                   | —                                                                          | —                                          | —                                                                                              |
| ЛГСИ-2                   | 1,568                                          | 65,3                  | 1,3                                    | 1—2                                                                 | —                                                                                   | —                                                                          | 300                                        | 3,0                                                                                            |



В полупроводниковых лазерах, в отличие от лазеров на примесных кристаллах, активным веществом служит сама кристаллическая матрица полупроводника, а примеси лишь служат источником носителей заряда: электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. При создании с помощью накачки избыточного (по сравнению с равновесным) числа электронов и дырок возможно возвращение к состоянию равновесия посредством оптического межзонного перехода — фоторекомбинации. Вероятность фоторекомбинации велика лишь для прямозонных полупроводников, таких, у которых максимум энергии в валентной зоне и минимум энергии в зоне проводимости соответствуют одному и тому же значению квазиимпульса. По этой причине все полупроводники, на которых получена генерация, являются прямозонными. Перечислим важнейшие свойства полупроводниковых лазеров:

1) компактность, обусловленная большим коэффициентом усиления ( $10^4 \text{ см}^{-1}$ );

2) большой КПД (до 40%);

3) широкий диапазон длин волн генерации (0,3—30 мкм) и возможность плавной перестройки длины волны генерации, обусловленная зависимостью ширины запрещенной зоны полупроводника от температуры, давления, магнитного поля и т. п.;

4) малая инерционность, позволяющая модулировать излучение изменением накачки с частотой до 10 ГГц.

Инверсия населенностей для перехода с энергией  $\hbar\omega$  возникает при условии  $\Delta F = F_c - F_v > \hbar\omega > E_g$ , где  $F_c$  и  $F_v$  — квазиуровни Ферми для электронов и дырок соответственно;  $E_g$  — ширина запрещенной зоны. На практике часто энергия фотона меньше номинального значения ширины запрещенной зоны, что связано с появлением при сильном легировании примесных зон на краю запрещенной зоны.

Для создания инверсии в полупроводниках используют четыре типа возбуждения: инжекцию носителей заряда, электронную накачку, ударную ионизацию (лавинный пробой) и оптическую накачку. Наибольшую эффективность имеют два первых типа накачки, которые и получили самое широкое распространение.

В качестве резонаторов полупроводниковых лазеров обычно используют плоские резонаторы, образуемые параллельными гранями кристалла. Для получения более эффективной спектральной селекции применяются внешние резонаторы с соответствующими селектирующими элементами, а также резонаторы с распределенной обратной связью (РОС). В РОС-лазерах периодические возмущения, определяющие спектральную селекцию, вносятся по всей длине активной среды. Коэффициент отражения, обеспечиваемый периодической структурой, оказывается достаточным для возникновения генерации без дополнительных зеркал. Периодическое возмущение, внесенное лишь на конце активного слоя, воспроизводит эффект зеркала и носит название распределенного брэгговского рефлектора.

Литература обзорного характера и монографии, включающие описание свойств полупроводниковых лазеров, указаны в [54—59].

**Материалы для полупроводниковых лазеров.** В качестве активных сред полупроводниковых лазеров используются в подавляющем большинстве случаев бинарные полупроводниковые соединения или многокомпонентные твердые растворы на их основе, так как элементарные полупроводники не являются прямозонными. В табл. 34.6 представлены полупроводниковые материалы, используемые в качестве рабочего вещества лазеров, и указаны способ накачки.

Твердыми растворами называют вещества, имеющие одинаковый тип кристаллической решетки и способные

| Тип соединения                                            | Рабочее вещество              | Длина волны, мкм | Вид накачки*2 |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| A <sup>3</sup> B <sup>5</sup>                             | GaN                           | 0,36             | О             |
|                                                           | GaAs                          | 0,83—0,92        | ИОЭП          |
|                                                           | InP                           | 0,89—0,91        | ИОП           |
|                                                           | GaSb                          | 1,5—1,6          | ИОЭ           |
|                                                           | InAs                          | 3,0—3,2          | ИОЭ           |
|                                                           | InSb                          | 4,8—5,3          | ИОЭ           |
|                                                           | (Ga, In) P*1                  | 0,56—            | ИО            |
|                                                           |                               | 0,9 [56]         |               |
|                                                           | (Al, Ga) As*1                 | 0,63—            | ИЭ            |
|                                                           |                               | 0,9 [56]         |               |
|                                                           | Ga (As, P)*1                  | 0,63—            | ИЭ            |
|                                                           |                               | 0,9 [56]         |               |
|                                                           | (Al, Ga) (PAs)                | 0,63—            | ИЭ            |
|                                                           |                               | 0,9 [56]         |               |
|                                                           | (In, Ga) As*1                 | 0,9—             | ИО            |
|                                                           |                               | 3,4 [56]         |               |
|                                                           | In (P, As)                    | 0,9—3,2          | И             |
|                                                           | Ga (As, Sb)                   | 0,95—1,6         | И             |
| A <sup>2</sup> B <sup>6</sup>                             | In (As, Sb)                   | 1,0—5,3          | И             |
|                                                           | (Al, Ga) Sb                   | 1,2—             | Э             |
|                                                           |                               | 1,8 [56]         |               |
|                                                           | (In, Ga) (P, As)              | 0,62—3,2         | И             |
|                                                           | (Al, Ga) (As, Sb)             | 0,62—1,6         | И             |
|                                                           | ZnO                           | 0,37             | ОЭ            |
|                                                           | Zn                            | 0,33             | ОЭ            |
|                                                           | ZnSe                          | 0,46             | Э             |
|                                                           | ZnTe                          | 0,53             | Э             |
|                                                           | CdS                           | 0,49             | ИЭП           |
|                                                           | CdSe                          | 0,69             | ИЭ            |
|                                                           | CdTe                          | 0,79             | Э             |
| A <sup>4</sup> B <sup>6</sup>                             | (Zn, Cd) S                    | 0,33—0,49        | И             |
|                                                           | C (S, Se)                     | 0,59—0,69        | ИЭ            |
|                                                           | (Cd, Hg) Te                   | 3,8—4,1          | И             |
|                                                           | PbS                           | 4,3              | ИЭ            |
|                                                           | PbSe                          | 8,5              | ИЭ            |
|                                                           | PbTe                          | 6,5              | ИЭ            |
|                                                           | P (S, Se)                     | 4,7—5,5          | ИОЭ           |
|                                                           | (Pb, Sn) Se                   | 8,5—32           | ИЭ            |
|                                                           | (Pb, Sn) Te                   | 6,5—32           | ИЭ            |
|                                                           | (Pb, Ge) Te                   | 4,4—6,5          | И             |
| (A <sup>4</sup> , A <sup>2</sup> )B <sup>6</sup>          | (Pb, Cd) S                    | 3,5              | И             |
|                                                           | Te                            | 3,7              | Э             |
|                                                           | A <sup>6</sup>                |                  |               |
| A <sup>3</sup> B <sup>6</sup>                             | GaSe                          | 0,59—0,60        | ОЭ            |
|                                                           | InSe                          | 0,97             | Э             |
| A <sub>2</sub> <sup>3</sup> B <sup>6</sup>                | In <sub>2</sub> Se            | 1,6              | Э             |
| A <sub>3</sub> <sup>2</sup> B <sub>2</sub> <sup>5</sup>   | C <sub>3</sub> P <sub>2</sub> | 2,1              | О             |
| A <sup>2</sup> B <sup>4</sup> C <sub>2</sub> <sup>6</sup> | CdSnP <sub>2</sub>            | 1,1              | Э             |
|                                                           | CdSiAs <sub>2</sub>           | 0,77             | Э             |

\*1 Лазеры производятся промышленностью.

\*2 Здесь И — инжекция, Э — электронный пучок, О — оптическая накачка, П — пробой.

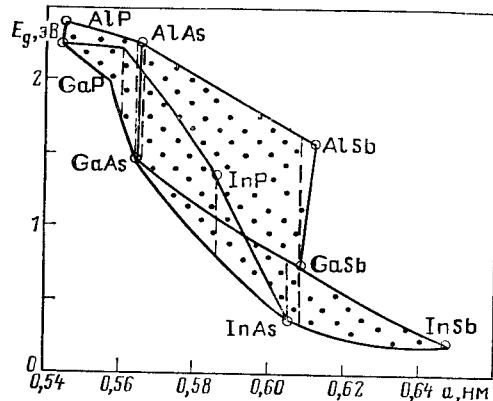


Рис. 34.12. Зависимость ширины запрещенной зоны от периода решетки в полупроводниковых соединениях типа  $A^3B^5$  и твердых растворах на их основе [60]

рооструктурах (ДГС) использованием как ограничения неосновных носителей заряда (электронов и дырок), так и оптического ограничения генерируемого излучения. В ДГС активная область расположена между двумя гетеропереходами. Например, в ДГС на основе  $Al_xGa_{1-x}As$  это слой  $p$  GaAs с шириной запрещенной зоны  $E_g = 1,4$  эВ, расположенный между слоями  $p$   $Al_xGa_{1-x}As$  ( $E_g = 1,8$  эВ).

Поскольку показатель преломления узкозонного полупроводника с ДГС больше, чем показатель преломления широкозонных слоев, возникает волновод, локализуя генерируемое излучение вблизи активной области. Выходная плотность мощности полупроводникового лазера ограничена лучевой прочностью кристалла, поэтому для повышения выходной мощности гетеролазера используют раздельное ограничение носителей и излучения в пятислойных структурах, например:

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| $p$ $Al_xGa_{1-x}As$ | $E_g = 1,8$ эВ; |
| $p$ $Al_yGa_{1-y}As$ | $E_g = 1,5$ эВ; |
| $p$ GaAs             | $E_g = 1,4$ эВ; |
| $n$ $Al_yGa_{1-y}As$ | $E_g = 1,5$ эВ; |
| $n$ $Al_xGa_{1-x}As$ | $E_g = 1,8$ эВ; |

причем  $x \approx 0,3$ ;  $y \approx 0,1$ .

Активным слоем является GaAs, электронное ограничение присутствует на границах слоя GaAs, а стенками волновода служат переходы между  $Al_xGa_{1-x}As$  и  $Al_yGa_{1-y}As$ . Раздельное ограничение по носителям и излучению в пятислойных структурах позволяет также без ухудшения свойств волновода значительно уменьшить размеры активного слоя, что приводит к уменьшению порогового тока. Для получения генерации в широком спектральном диапазоне в ДГС помимо уникальной структуры  $Al_xGa_{1-x}As$  используются многокомпонентные твердые растворы (рис. 34.13).

Для того чтобы ширина активной области лазера была сравнима с толщиной гетероперехода или не сильно превышала ее, применяют ограничение носителей и излучения в плоскости гетероперехода. Лазеры такой конфигурации называют плоскостными. В простейшем полосковом лазере инжекция носителей заряда производится через полосковый контакт при этом осуществляется только электронное ограничение. В более сложных структурах боковому ограничению подвергаются и распределение носителей, и излучение лазера. Методы ограничения носителей сходны с теми, которые применяются для ограничения носителей и излучения в направлении, перпендикулярном плоскости лазера, т. е.  $p-n$ .

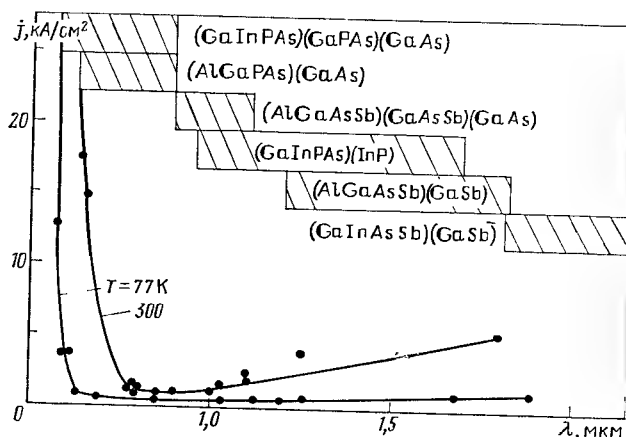


Рис. 34.13. Перекрывание спектральных диапазонов четверными системами типа  $A^3B^5$  и спектральная зависимость пороговых плотностей тока в инжекционных гетеролазерах [56]

образовывать непрерывный ряд растворов с переменной концентрацией компонентов, что позволяет изменять ширину запрещенной зоны полупроводника (рис. 34.12).

В гетеролазерах требуется, чтобы контактирующие материалы обладали одинаковым типом и периодом решетки. Единственным тройным твердым раствором, в котором изменение ширины запрещенной зоны практически не сопровождается изменением периода решетки, является  $Al_xGa_{1-x}As$  (рис. 34.12), что и обусловило широкое применение этого соединения в гетеропереходах  $Al_xGa_{1-x}GaAs$ . Для четверных соединений можно добиться совпадения периода решетки с периодом бинарного соединения с помощью изопериодического замещения двух атомов. Так, в четверном растворе  $Ga_xIn_{1-x}P_{1-y}As_y$  можно подобрать  $x$  и  $y$  так, чтобы влияние Ga и As на период взаимно компенсировалось и период решетки совпадал с периодом бинарного соединения InP. Смещение в твердом растворе соединений, обладающих зонами разных типов, позволяет производить переход от прямого проводника к непрямому изменением концентрации компонентов. Примером таких соединений служат  $GaP_xAs_{1-x}$ ;  $In_{1-x}Ga_xP$ ;  $Al_xGa_{1-x}As$ . В твердом растворе  $Pb_{1-x}Sn_xSe$  при  $x=0,15$  ( $T=12$  K) ширина запрещенной зоны проходит через нуль, что позволяет создать длинноволновые лазеры (длина волны генерации  $\lambda=32$  мкм).

**Инжекционные лазеры.** Простейший инжекционный лазер, или гомолазер, по существу представляет собой сильно легированный  $p-n$ -переход, при смещении которого в прямом направлении неосновные носители заряда инжектируются сквозь  $p-n$ -переход на расстояние порядка диффузионной длины и рекомбинируют с основными. При фоторекомбинации в плоскости  $p-n$ -перехода возникает вынужденное излучение. Пороговая плотность тока такого лазера на GaAs составляет  $20-50$  кА/см<sup>2</sup> при  $T=20^\circ\text{C}$ . Уменьшение пороговой плотности тока до  $5$  кА/см<sup>2</sup> достигнуто в односторонних гетероструктурах, где наряду с  $p-n$ -переходом имеется гетеропереход в полупроводник с большей шириной запрещенной зоны, например гетеропереход  $GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ . Гетеропереход расположен на расстоянии от  $p-n$ -перехода, меньшем диффузионной длины, и препятствует диффузии неосновных носителей (электронное ограничение), увеличивая тем самым их концентрацию. Поскольку большей подвижностью обладают обычно электроны, гетеропереходами, как правило, являются  $p-p$ -переходы. Еще большее уменьшение пороговой плотности тока (для значений ниже  $1$  кА/см<sup>2</sup>) при  $T=20^\circ\text{C}$  достигнуто в двойных гете-

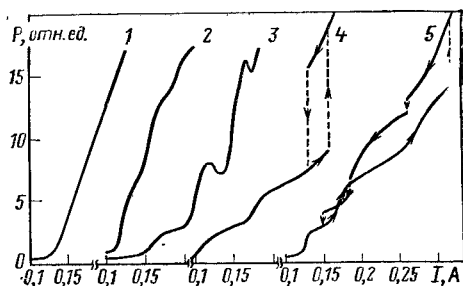


Рис. 34.14. Примеры ватт-амперных характеристик непрерывных полосковых гетеролазеров:

1 — линейные; 2, 3 — гладкие нелинейные (2 — монотонные, 3 — немонотонные); 4, 5 — разрывные (4 — простая петля, 5 — самопересекающаяся петля с разрывами) [57]

переходы и гетероструктуры используются в боковом направлении. Помимо того, возможно геометрическое боковое ограничение. Если в полосковых лазерах отсутствует боковое оптическое ограничение, то зависимость мощности выходного излучения от тока накачки становится нелинейной (рис. 34.14). Это связано с тем, что поперечный размер лазерной моды в полосковых лазерах сравним с шириной пространственного распределения коэффициента усиления. В максимуме интенсивности лазерной моды происходит наиболее эффективный съем инверсии, вследствие чего распределение инверсии и коэффициента преломления становится более благоприятным для генерации другой моды. Изменение генерируемой моды обуславливает особенности ватт-амперных характеристик полоскового лазера.

Объем активной среды лазера, накачиваемого электронным пучком или светом, в  $10^4$ — $10^6$  раз больше, чем у инжекционного лазера, что позволяет поднять мощность выходного излучения на несколько порядков. Так, если выходная мощность инжекционного лазера не превышает сотни ватт, то в лазере с электронной накачкой получена мощность 1—2 кВт, а в GaAs-лазере с оптической накачкой 40 кВт [55].

#### 34.6. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ АКТИВАТОРАМИ

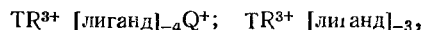
В жидкостных лазерах в качестве активных сред используются растворы, содержащие ионы редкоземельных элементов (TR-ионы). Генерация осуществляется на переходах с метастабильных уровней  $TR^{3+}$ -ионов. Для возбуждения применяется оптическая накачка с помощью ксеноновых газоразрядных ламп.

В жидких лазерных материалах может быть достигнута концентрация активных ионов того же порядка, что и в лазерных стеклах. Это позволяет получить большие энергии и мощности излучения с единицы объема активного вещества. В то же время сильная зависимость показателя преломления от температуры обуславливает значительные оптические неоднородности, возникающие при накачке активной среды, что приводит к ухудшению генерационных характеристик лазеров и увеличению расходимости лазерного пучка. Применение прокачки активной жидкости через лазерную кювету позволяет реализовать как периодический, так и непрерывный режим работы лазера.

Жидкие лазерные материалы с  $TR^{3+}$ -ионами делятся на два класса: металлоорганические, или хелатные, и неорганические, или апротонные.

**Металлоорганические жидкостные лазеры.** Активными элементами в металлоорганических лазерах являются трехвалентные ионы редкоземельных элементов, связанные с органическими группами, или лигандами. Лазерный эффект осуществляется на переходах между энергетическими уровнями  $TR^{3+}$ -ионов, а поглощение энергии накачки происходит через полосы поглощения лиганда. Хелаты имеют очень большие коэффициенты поглощения (около  $100 \text{ см}^{-1}$ ), поэтому лазерный эффект осуществляется только в тонких слоях вещества. Металлоорганические жидкостные лазеры генерируют в режиме одиночных импульсов.

Различают два главных типа лазерных компаундов:



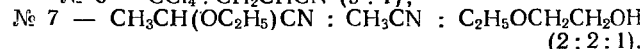
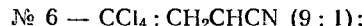
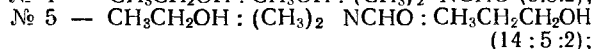
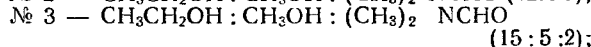
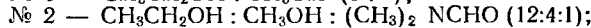
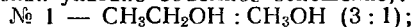
где  $Q^+$  означает катион.

Наиболее часто в металлоорганических жидкостных лазерах употребляются следующие лиганды, катионы и растворители.

**Лиганды:** трифторацетилацетонат-ион (ТФАА<sup>-</sup>), бензоилацетонат-ион (БА<sup>-</sup>), бензоилтрифторацетонат-ион (БТФА<sup>-</sup>), дейтерированный бензоилтрифторацетонат-ион (ДБТФА<sup>-</sup>), ортофторбензоилтрифторацетонат-ион (ОФБТФА<sup>-</sup>), метафторбензоилтрифторацетонат-ион (МФБТФА<sup>-</sup>), парафторбензоилтрифторацетонат-ион (ПФБТФА<sup>-</sup>), ортохлорбензоилтрифторацетонат-ион (ОХБТФА<sup>-</sup>), метаклорбензоилтрифторацетонат-ион (МХБТФА<sup>-</sup>), параклорбензоилтрифторацетонат-ион (ПХБТФА<sup>-</sup>), ортобромбензоилтрифторацетонат-ион (ОББТФА<sup>-</sup>), метабромбензоилтрифторацетонат-ион (МББТФА<sup>-</sup>), парабромбензоилтрифторацетонат-ион (ПББТФА<sup>-</sup>), дибензоилметанат-ион (ДБМ<sup>-</sup>), теноилтрифторацетонат-ион (ТТФА<sup>-</sup>), пентафторпропионат-ион (ПФП<sup>-</sup>), 1,10-фенантролин (Фен), дейтерированный трибутилфосфат (ДТБФ).

**Катионы:** пиперидиний (Пип<sup>+</sup>), дейтерированный пиперидиний (ДПип<sup>+</sup>), пирролидиний (Пирр<sup>+</sup>), имидазолий (Им<sup>+</sup>), диметил-аммоний (ДмА<sup>+</sup>).

**Комбинированные растворители** (в скобках указано объемное отношение):



Характеристики ряда металлоорганических жидкостных лазеров приведены в табл. 34.7. Генерация на комплексах  $\text{Eu}^{3+}$  происходит на переходе  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ , на комплексах  $\text{Nd}^{3+}$  — на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ .

**Неорганические жидкостные лазеры.** Активные среды неорганических жидкостных лазеров представляют собой растворы соединений  $TR^{3+}$ -ионов в неорганических растворителях сложного состава. Лазерный эффект достигнут пока только для ионов  $\text{Nd}^{3+}$  (табл. 34.8). Генерация идет по четырехуровневой схеме на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  с поглощением света накачки собственными полосами поглощения  $\text{Nd}^{3+}$ . Неорганические жидкостные лазеры могут работать с циркулирующей рабочей рещества, дают высокие значения выходной мощности. Эти лазеры работают как в режиме свободной генерации, так и с модуляцией добротности.

Более подробные сведения о жидкостных лазерах содержатся в [1].

Таблица 34. 7. Металлоорганические лазерные жидкости [1]

| Активный комплекс                                                                         | Растворитель                                       | Длина волны генерации, мкм | Концентрация комплекса, моль/л | Люминесцентное время жизни, мкс | Ширина линии люминесценции, см <sup>-1</sup> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Eu <sup>3+</sup> (БА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пип <sup>+</sup>                         | № 1                                                | 0,6130                     | 8,7·10 <sup>-3</sup>           | 500                             | 21                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (БА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пип <sup>+</sup> + CH <sub>3</sub> COONa | № 1 или № 2                                        | 0,6131                     | 1·10 <sup>-2</sup>             | —                               | 21                                           |
|                                                                                           |                                                    | 0,6114                     | 2·10 <sup>-2</sup>             | —                               | 23                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (БА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Na <sup>+</sup>                          | № 3 или № 5                                        | 0,6111                     | 2·10 <sup>-2</sup>             | 670                             | 19                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (БА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>             | № 1                                                | 0,6130                     | 1,5·10 <sup>-2</sup>           | —                               | —                                            |
| Eu <sup>3+</sup> (ДБМ <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пип <sup>+</sup>                        | № 4                                                | 0,6120                     | 1,5·10 <sup>-2</sup>           | —                               | 16                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (ДБМ <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пирр <sup>+</sup>                       | CH <sub>3</sub> CN                                 | —                          | 2,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | —                                            |
| Eu <sup>3+</sup> (ТФАА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>           | № 1                                                | 0,6122                     | 1,5·10 <sup>-2</sup>           | —                               | —                                            |
|                                                                                           | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,6119                     | 1·10 <sup>-2</sup>             | —                               | —                                            |
| Eu <sup>3+</sup> (ТТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                       | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,6125                     | 5·10 <sup>-3</sup>             | —                               | —                                            |
| Eu <sup>3+</sup> (БТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Им <sup>+</sup>                        | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,6118                     | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 69                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (БТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пирр <sup>+</sup>                      | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,6118                     | 5·10 <sup>-3</sup>             | —                               | 107                                          |
| Eu <sup>3+</sup> (БТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пип <sup>+</sup>                       | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,6119                     | 1·10 <sup>-2</sup>             | —                               | 91                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (БТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДПип <sup>+</sup>                      | № 7                                                | —                          | 1,135·10 <sup>-2</sup>         | 700                             | —                                            |
| Eu <sup>3+</sup> (ДБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пип <sup>+</sup>                      | № 7                                                | —                          | 1,135·10 <sup>-2</sup>         | 680                             | —                                            |
| Eu <sup>3+</sup> (ДБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДПип <sup>+</sup>                     | № 7                                                | —                          | 1,135·10 <sup>-2</sup>         | 660                             | —                                            |
| Eu <sup>3+</sup> (БТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                       | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61175                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 83                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (ОФБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61167                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 80                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (МФБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61178                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 87                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (ПФБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61173                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 83                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (ОХБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61174                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 67                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (МХБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61171                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 85                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (ПХБТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61172                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 85                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (ОББТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61174                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 67                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (МББТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61173                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 83                                           |
| Eu <sup>3+</sup> (ПББТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> ДМА <sup>+</sup>                     | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,61171                    | 7,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | 87                                           |
| Tb <sup>3+</sup> (ТФАА <sup>-</sup> ) <sub>3</sub>                                        | CH <sub>3</sub> CN                                 | 0,5470                     | 2,5·10 <sup>-3</sup>           | —                               | —                                            |
| Nd <sup>3+</sup> (ПФП <sup>-</sup> ) <sub>3</sub> Фен                                     | (CD <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO                 | 1,057                      | 2·10 <sup>-1</sup>             | —                               | 140                                          |
| Nd <sup>3+</sup> (ТТФА <sup>-</sup> ) <sub>4</sub> Пирр <sup>+</sup>                      | № 6                                                | —                          | 1·10 <sup>-2</sup>             | —                               | —                                            |
| Nd <sup>3+</sup> (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) <sub>3</sub> (ДТБФ) <sub>3</sub>         | C <sub>6</sub> F <sub>6</sub> или CCl <sub>4</sub> | 1,054                      | 2·10 <sup>-1</sup>             | II                              | 100                                          |

Таблица 34.8 Неорганические лазерные жидкости [1]

| Состав лазерной жидкости                                                    | Длина волны генерации, мкм | Концентрация активатора, моль/л | Люминесцентное время жизни, мкс | Ширина линии люминесценции, см <sup>-1</sup> |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Nd <sup>3+</sup> — SeOCl <sub>2</sub> — SnCl <sub>4</sub>                   | 1,056                      | 0,5 м                           | 110                             | 145                                          |
|                                                                             | 1,058                      | 0,1 м                           | 83                              | —                                            |
|                                                                             | 1,058                      | 0,3 м                           | 230                             | 165                                          |
| Nd <sup>3+</sup> — SeOCl <sub>2</sub> — SbCl <sub>5</sub>                   | —                          | —                               | 225                             | —                                            |
| Nd <sup>3+</sup> — SOCl <sub>2</sub> — GaCl <sub>3</sub> [2]                | 1,0575                     | —                               | 270                             | 102                                          |
| Nd <sup>3+</sup> — POCl <sub>3</sub> — SnCl <sub>4</sub>                    | 1,0525                     | 4%*                             | 280                             | 145                                          |
|                                                                             | 1,0522                     | 0,86%*                          | 180                             | 100                                          |
| Nd <sup>3+</sup> — POCl <sub>3</sub> — TiCl <sub>3</sub>                    | 1,0525                     | 3%                              | 230                             | —                                            |
|                                                                             | 1,0542                     | —                               | 140                             | —                                            |
| Nd <sup>3+</sup> — POCl <sub>3</sub> — AlCl <sub>3</sub>                    | 1,054                      | 0,15 м                          | 300                             | —                                            |
|                                                                             | 1,05219                    | —                               | —                               | —                                            |
| Nd <sup>3+</sup> — POCl <sub>3</sub> — ZrCl <sub>4</sub>                    | 1,0522                     | 0,3 м                           | 300                             | 145                                          |
| Nd <sup>3+</sup> — PBr <sub>3</sub> — AlBr <sub>3</sub> — SbBr <sub>3</sub> | 1,066                      | 0,5%                            | 230                             | 113                                          |

\* Массовое содержание.

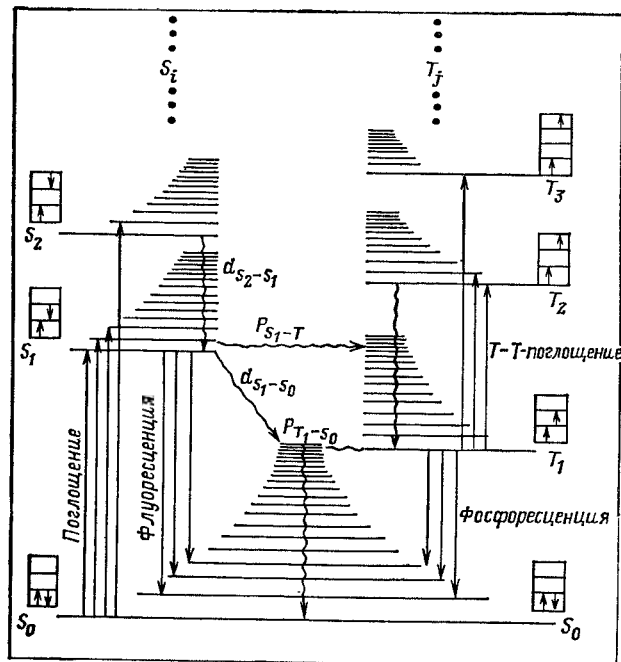


Рис. 34.15. Схема синглетных ( $S_i$ ) и триплетных ( $T_j$ ) уровней энергии сложной молекулы (у каждого уровня показана относительная ориентация спинов внешних электронов)

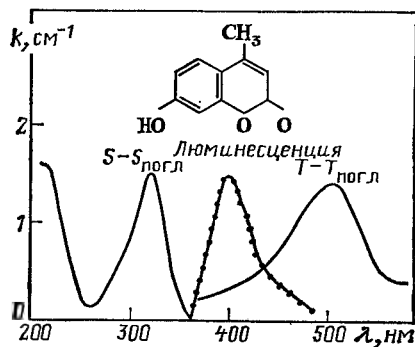


Рис. 34.16. Спектры поглощения ( $S \rightarrow S_{\text{погл}}$ ), люминесценции и триплет-триплетного поглощения ( $T \rightarrow T_{\text{погл}}$ ) нейтральной формы 7-оксо-4-метилкумарина

### 34.7. ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ

В настоящее время красителями принято называть химические соединения с разветвленной системой сопряженных химических связей, обладающие интенсивными полосами поглощения в видимой или ближней ультрафиолетовой области спектра. Схема уровней энергии молекулы красителя приведена на рис. 34.15. Общими особенностями спектроскопических характеристик красителей являются зеркальная симметрия спектров поглощения  $S_0 \rightarrow S_1$  и люминесценции, а также частичное перекрытие спектра люминесценции спектром поглощения (рис. 34.16).

Усиление света и генерация света в растворах красителей при их оптическом возбуждении обусловлены

возникновением инверсной населенности колебательных подуровней первого возбужденного синглетного состояния  $S_1$  по отношению к колебательным подуровням основного состояния  $S_0$ . Коэффициент усиления с учетом триплет-триплетного поглощения и поглощения из возбужденного состояния  $S_1$  имеет следующий вид [62]:

$$k_{yc} = \kappa_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu) \left[ \frac{n_{S_1}}{n} \left( 1 - \frac{B_{S_1 \rightarrow S_i}(\nu)}{B_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu)} - \frac{n_{S_0}}{n_{S_1}} e^{-\frac{h(\nu_{эл}-\nu)}{kT}} - \frac{n_{T_1}}{n_{S_1}} \frac{B_{T_1 \rightarrow T_j}(\nu)}{B_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu)} \right) \right]. \quad (34.1)$$

Здесь  $\kappa_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu) = (h\nu/\nu) B_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu) n$  — предельный коэффициент усиления;  $\nu$ , см/с — скорость света в среде;  $h\nu$ , Дж — энергия кванта;  $B_{S_1 \rightarrow S_0}$ ,  $B_{S_1 \rightarrow S_i}$ ,  $B_{T_1 \rightarrow T_j}$ , Дж $^{-1}$ ·с $^{-1}$ ·см $^3$  — коэффициенты Эйнштейна для вынужденного испускания, синглетного и триплетного погло-

щения соответственно;  $\frac{n_{S_0}}{n_{S_1}}$ ,  $\frac{n_{S_1}}{n}$ ,  $\frac{n_{T_1}}{n_{S_1}}$  — отно-

сительные населенности уровней  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $T_1$ ;  $n$ , см $^{-3}$  — концентрация молекул красителя.

Усиление невозможно при

$$B_{S_1 \rightarrow S_i}(\nu) \geq B_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu), \quad (34.2)$$

а также при накоплении на триплетном уровне  $T_1$  такого числа молекул, что

$$n_{T_1}/n_{S_1} \geq B_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu)/B_{T_1 \rightarrow T_j}(\nu). \quad (34.3)$$

В стационарном режиме

$$n_{T_1}/n_{S_1} = P_{S_1 \rightarrow T_1}/P_{T_1 \rightarrow S_0}, \quad (34.4)$$

где  $P_{S_1 \rightarrow T_1}$ ,  $P_{T_1 \rightarrow S_0}$  — вероятности соответствующих переходов. Следовательно, невозможен стационарный режим генерации лазера на красителе, для которого выполняется условие

$$B_{S_1 \rightarrow S_0}(\nu) \leq B_{T_1 \rightarrow T_j}(\nu) P_{S_1 \rightarrow T_1}/P_{T_1 \rightarrow S_0}. \quad (34.5)$$

При импульсном возбуждении возможна генерация и при выполнении условия (34.5). Из (34.5) следует, что эффективные лазерные красители должны обладать: высоким квантовым выходом люминесценции; слабым перекрытием спектров  $T_1 \rightarrow T_j$  и  $S_1 \rightarrow S_i$  поглощения со спектром люминесценции; малым накоплением молекул в триплетном состоянии, что возможно при малом значении вероятности  $P_{S_1 \rightarrow T_1}$  и большом значении вероятности  $P_{T_1 \rightarrow S_0}$ . Насколько жесткими являются эти требования, можно судить по тому, что из тысяч промышленных красителей генерационной способностью при накачке импульсами наносекундной длительности обладают лишь несколько сот соединений. При накачке микросекундными импульсами генерируют десятки соединений, а при более длинных импульсах, с  $\lambda$  порядка ста микросекунд, — вообще единичные красители. Анализ генерационной эффективности красителей различных классов показывает, что в большей или меньшей степени указанным выше требованиям удовлетворяют следующие красители: производные оксазола, оксадиазола, бензола и их конденсированных аналогов; производные кумарина, родамина, оксазина и полиметиновые красители.

В табл. 34.9 представлены спектрально-люминесцентные и генерационные свойства наиболее эффективных лазерных красителей.

Таблица 34.9. Спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики наиболее эффективных лазерных красителей [62]

[ $\lambda_{\text{макс погл}}$ ,  $\lambda_{\text{макс люм}}$  — длины волн, соответствующие максимумам спектров поглощения и люминесценции;  $\eta$  — квантовый выход люминесценции;  $B_{S_0 \rightarrow S_1} (\lambda_{\text{макс погл}})$  — коэффициент Эйнштейна в максимуме спектра поглощения;  $\tau_{S_1}$  — время жизни первого возбужденного синглетного состояния  $S_1$ ;  $\lambda_{\text{нак}}$  — длина волны излучения накачки;  $(\lambda_1 - \lambda_2)_{\text{ген}}$  — поглощение спектра генерации;  $\gamma$  — КПД генерации;  $K (\lambda_{\text{нак}})$  — коэффициент поглощения на длине волны накачки; FL — накачка газоразрядной импульсной лампы. Растворители: DMF —  $N, N'$ -диметилформамид; Etan — этанол; EG, — этиленгликоль. Индекс «осн» означает основание, «кисл» — кислота]

| Краситель                                                           | Растворитель                      | $\lambda_{\text{макс погл}}$ , нм | $\lambda_{\text{макс люм}}$ , нм | $\eta$ , % | $B_{S_0 \rightarrow S_1} (\lambda_{\text{макс погл}})$ , $\text{Дж}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^3$ | $\tau_{S_1}$ , $10^{-10}$ с | $\lambda_{\text{нак}}$ , нм | $(\lambda_1 - \lambda_2)_{\text{ген}}$ , нм | $\gamma$ , % | $K (\lambda_{\text{нак}})$ , $\text{см}^{-1}$ |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------|
| <i>p</i> -терфенил                                                  | DMP                               | 284                               | 345                              | 30         | —                                                                                                               | —                           | 265                         | 330—360                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | 280                               | 343                              | 70         | —                                                                                                               | —                           | 265                         | 330—362                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | Etan                              | 277                               | 340                              | 85         | —                                                                                                               | —                           | 265                         | 330—362                                     | —            | —                                             |
| <i>p</i> -кватерфенил                                               | DMF                               | 300                               | 373                              | 68         | —                                                                                                               | —                           | 337                         | 355—390                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 298                               | 374                              | 49         | —                                                                                                               | —                           | 265                         | 362—390                                     | —            | —                                             |
|                                                                     |                                   |                                   |                                  |            |                                                                                                                 |                             | 337                         | 362—390                                     | —            | —                                             |
| 2-фенил-5-(4'-бифенилил)-1, 3, 4-оксадиазол (PBD)                   | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | 307                               | 361                              | 86         | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 370—386                                     | 31           | 7                                             |
|                                                                     | Etan                              | 302                               | 365                              | 21         | —                                                                                                               | —                           | 337                         | 372—400                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 308                               | 365                              | 24         | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 372—384                                     | 6            | 3                                             |
|                                                                     |                                   |                                   |                                  |            | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 374—384                                     | 17           | 20                                            |
| 2,5-ди-(4'-бифенил)-1, 3, 4-оксадиазол (BBD)                        | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 312                               | 383                              | 47         | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 374—386                                     | 17           | 18                                            |
| 2,5-дифенил - 1, 3, 4-оксадиазол (PPD)                              | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | 284                               | 334                              | 65         | —                                                                                                               | —                           | 337                         | 383—395                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | Etan                              | 280                               | 332                              | 82         | —                                                                                                               | —                           | 337                         | 383—395                                     | —            | —                                             |
| 2,5-ди- $\alpha$ -нафтил-1, 3, 4-оксадиазол ( $\alpha\text{NaND}$ ) | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | —                                 | —                                | —          | —                                                                                                               | —                           | 337                         | 384—397                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 337                               | 392                              | 75         | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 388—394                                     | 14           | 20                                            |
| 1,4-дифенил-1,3-бутадиен                                            | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 333                               | 383                              | 23         | —                                                                                                               | —                           | 265                         | 383                                         | —            | —                                             |
|                                                                     |                                   |                                   |                                  |            |                                                                                                                 |                             | 353                         | 383                                         | —            | —                                             |
| 2,5-дифенил-1, 3-оксазол (PPO)                                      | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 306                               | 366                              | 99         | 4                                                                                                               | 16                          | 347                         | 360—370                                     | 4            | 14                                            |
|                                                                     | DMF                               | 305                               | 365                              | 77         | 5                                                                                                               | 10                          | 347                         | 372—392                                     | 5            | 16                                            |
|                                                                     | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | 304                               | 364                              | 90         | 5                                                                                                               | 11                          | 337                         | 375—387                                     | —            | —                                             |
|                                                                     |                                   |                                   |                                  |            |                                                                                                                 |                             | 347                         | 378—386                                     | 5            | 6                                             |
| 2-( $\alpha$ -нафтил)-5-фенил-1, 3-оксазол ( $\alpha\text{NPO}$ )   | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | 334                               | 400                              | 77         | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 396—406                                     | 13           | 23                                            |
| 2,5-ди-(4'-бифенил)-1, 3-оксазол (BBO)                              | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 340                               | 409                              | 83         | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 404—420                                     | 16           | 19                                            |
|                                                                     | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | 340                               | 406                              | 76         | —                                                                                                               | —                           | 337                         | 404—420                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | Etan                              |                                   |                                  |            | —                                                                                                               | —                           | 347                         | 408—418                                     | 29           | 22                                            |
|                                                                     |                                   | 340                               | 407                              | 96         | —                                                                                                               | —                           | 347                         | У порога                                    | —            | 4                                             |
| 1, 4-ди-(5'-фенил-1', 3'-оксазол-2'-ил)-бензол (POPOR)              | $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$  | —                                 | —                                | —          | —                                                                                                               | —                           | 337                         | 414—426                                     | —            | —                                             |
|                                                                     | $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ | 360                               | 420                              | 84         | 8                                                                                                               | 14                          | 347                         | 416—418                                     | 28           | 18                                            |
|                                                                     | DMF                               | 361                               | 426                              | 87         | 10                                                                                                              | 11                          | 347                         | 416—418                                     | 27           | 22                                            |
|                                                                     |                                   |                                   |                                  |            |                                                                                                                 |                             | 347                         | 428—430                                     | 22           | 19                                            |

| Краситель                                                                        | Растворитель                             | $\lambda_{\text{макс погл нм}}$ | $\lambda_{\text{макс люм нм}}$ | $\eta, \%$ | $\frac{B_{S_0 \rightarrow S_1}}{\left( \lambda_{\text{макс погл}} \right)}, 10^7 \text{ Дж}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^3$ | $\tau_{S_1}, 10^{-10} \text{ с}$ | $\lambda_{\text{нак нм}}$ | $(\lambda_1 - \lambda_2)_{\text{ген нм}}$ | $\gamma, \%$    | $K (\lambda_{\text{нак}}), \text{ см}^{-1}$ |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|
| 1, 4-ди-[5'-(4''-метилфенил)-1', 3'-оксазол-2'-ил]-бензол (диметил РОРОР; ТОРОТ) | Etan<br>$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ | 364<br>364                      | 431<br>429                     | 86<br>88   | —<br>—                                                                                                                                  | —<br>—                           | 347<br>347                | 424—432<br>424—436                        | 24<br>34        | 7<br>20                                     |
| 2-[4'-(4''-фенилстирил)-фенил]-5-фенил-1, 3-оксазол                              | DMF                                      | 368                             | 435                            | 99         | —                                                                                                                                       | —                                | 347                       | 434—438                                   | 17              | 20                                          |
| 1, 4-дистирилбензол                                                              | DMF                                      | 356                             | —                              | —          | 8                                                                                                                                       | —                                | 347<br>347<br>347         | 408—422<br>408—424<br>408—422             | 29<br>23<br>14  | 32<br>13<br>7                               |
| 1-стирил-4-[ $\omega$ -винил-( <i>p</i> -бифенил)] бензол                        | DMF                                      | 370                             | —                              | —          | 3                                                                                                                                       | —                                | 347<br>347<br>347         | 424—442<br>426—442<br>430—442             | 30<br>23<br>16  | 24<br>12<br>6                               |
| 4-метил-7-днэтил-аминокумарин (кумарин 1)                                        | Etan                                     | 375                             | 454                            | 70         | 5                                                                                                                                       | 29                               | 337<br>347<br>FL          | 442—476<br>448—460<br>457—475             | —<br>25<br>0,1  | —<br>19<br>30                               |
| 4-метил-7-гидроксикумарин ( $\beta$ -метилумбеллиферон: кумарин 4)               | Etan <sub>осн</sub>                      | 370                             | 455                            | 95         | 3                                                                                                                                       | 42                               | 337<br>347<br>FL          | 444—473<br>446—462<br>456—467             | —<br>17<br>0,1  | —<br>19<br>30                               |
| 7-гидроксикумарин                                                                | Etan <sub>(осн)</sub>                    | 375                             | 461                            | 95         | —                                                                                                                                       | —                                | 337<br>347<br>FL          | 446—480<br>454—474<br>457—465             | —<br>35<br>0,1  | —<br>16<br>30                               |
| 4-метил-6-гексил-7-гидроксикумарин                                               | Etan <sub>(осн)</sub>                    | 386                             | 460                            | 90         | —                                                                                                                                       | —                                | 337<br>347<br>FL          | 449—478<br>450—480<br>458—472             | —<br>8<br>0,15  | —<br>16<br>30                               |
| 3-карбозтокси-7-гидроксикумарин (кумарин 15)                                     | Etan <sub>(осн)</sub>                    | 416                             | 460                            | 70         | —                                                                                                                                       | —                                | 347<br>337<br>FL          | 450—475<br>455—471<br>460—480             | 16<br>—<br>0,12 | 16<br>—<br>30                               |
| 3, 4-диметил-7-гидроксикумарин                                                   | Etan <sub>(осн)</sub>                    | 366                             | 460                            | 90         | —                                                                                                                                       | —                                | 347<br>337<br>FL          | 450—485<br>452—483<br>460—480             | 15<br>—<br>0,15 | 16<br>—<br>30                               |
| Кумарин 102                                                                      | Etan                                     | 396                             | —                              | —          | —                                                                                                                                       | —                                | 347<br>337<br>FL          | 450—500<br>460—500<br>480—500             | 20<br>—<br>0,18 | 16<br>—<br>30                               |
| 3-хлор-4-метил-7-ацетоксикумарин                                                 | Etan <sub>(осн)</sub>                    | 394                             | 476                            | 69         | 4                                                                                                                                       | 28                               | 337<br>347<br>FL          | 463—498<br>476—484<br>474—507             | 13<br>0,1       | 22<br>30                                    |
| 3-карбозтокси-6-гексил-7-гидроксикумарин                                         | Etan <sub>(осн)</sub>                    | 426                             | 454                            | —          | —                                                                                                                                       | —                                | 337<br>347<br>FL          | 465—483<br>465—485<br>476—484             | —<br>—<br>0,13  | —<br>—<br>30                                |

| Краситель                                                                | Растворитель           | $\lambda_{\text{макс погл}}^{\text{нм}}$ | $\lambda_{\text{макс люом}}^{\text{нм}}$ | $\eta, \%$ | $\frac{B_{S_0 \rightarrow S_1}}{(\lambda_{\text{макс погл}}^{\text{нм}})^2}$ ,<br>Дж $^{-1}$ ·с $^{-1}$ ·см $^3$ | $\tau_{S_1}, 10^{-10}$ с | $\lambda_{\text{нак}}^{\text{нм}}$ | $(\lambda_1 - \lambda_2)_{\text{ген}}^{\text{нм}}$ | $\gamma, \%$     | $K (\lambda_{\text{нак}}^{\text{нм}})^{-1}$ ,<br>см $^{-1}$ |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------|
| 3-фенил-7-ацетоксикумарин                                                | Etan <sub>(осн)</sub>  | 400                                      | 475                                      | 76         | 6                                                                                                                | 30                       | 337<br>347<br>FL                   | 470—494<br>474—494<br>481—495                      | —<br>19<br>0,1   | —<br>14<br>30                                               |
| 3-ацетил-6-гексил-7-гидроксикумарин                                      | Etan <sub>(осн)</sub>  | 443                                      | 468                                      | —          | —                                                                                                                | —                        | 347<br>FL                          | 475—505<br>494—500                                 | —<br>0,1         | —<br>30                                                     |
| Кумарин 334                                                              | Etan                   | 454                                      | 496                                      | —          | —                                                                                                                | —                        | 337<br>347<br>FL                   | 475—508<br>475—510<br>513—518                      | —<br>—<br>0,15   | —<br>—<br>30                                                |
| 3-циано-6-гексил-7-гидроксикумарин                                       | Etan <sub>(осн)</sub>  | 444                                      | 465                                      | —          | —                                                                                                                | —                        | 337<br>347<br>FL                   | 490—510<br>490—510<br>502—509                      | —<br>—<br>0,15   | —<br>—<br>30                                                |
| Кумарин I + диангидрид ПТК                                               | Etan <sub>(осн)</sub>  | —                                        | —                                        | —          | —                                                                                                                | —                        | 347                                | 495—515                                            | 10               | 20+0,7                                                      |
| Кумарин I + диангидрид ПТК                                               | Etan <sub>(осн)</sub>  | —                                        | —                                        | —          | —                                                                                                                | —                        | 347                                | 505—525                                            | 10               | 20+2                                                        |
| 1-амино-N-метилантрапиридон                                              | DMF                    | 454                                      | 500                                      | 33         | 3                                                                                                                | 45                       | 347<br>347                         | 502—512<br>504—510                                 | 3,5<br>4         | 27<br>15                                                    |
| Амидин                                                                   | DMF                    | 466                                      | 540                                      | 37         | 2                                                                                                                | 71                       | 347<br>347                         | 537—548<br>540—550                                 | 8<br>7           | 16<br>28                                                    |
| Антрапиридон 8                                                           | Etan                   | —                                        | —                                        | —          | —                                                                                                                | —                        | 347                                | 545—575                                            | 8                | 18                                                          |
| Диангидрид периллен-3, 4, 9, 10-тетракарбоновой кислоты (диангидрид ПТК) | Etan <sub>(осн)</sub>  | 468                                      | 486                                      | 99         | 4                                                                                                                | 119                      | 337<br>347                         | 512—530<br>516—532                                 | —<br>8           | —<br>7                                                      |
| Флуоресценн Na (уранин)                                                  | Etan                   | 500                                      | 522                                      | 61         | 7                                                                                                                | 50                       | 337<br>347<br>347<br>347           | 536—556<br>538—562<br>544—562<br>549—566           | —<br>4<br>6<br>5 | —<br>3<br>9<br>16                                           |
| Незамещенный родамин (родамин 110)                                       | Etan                   | 505                                      | 529                                      | 85         | 12                                                                                                               | 71                       | 347<br>FL                          | 554—570<br>556—567                                 | 4<br>0,15        | 8<br>23                                                     |
|                                                                          | Etan <sub>(кисл)</sub> | —                                        | —                                        | —          | —                                                                                                                | —                        | 347                                | 564—574                                            | 5                | 18                                                          |
| Родамин 6G (родамин 6G — DN; в отечественных изданиях родамин Ж)         | Etan                   | 530                                      | 556                                      | 85         | 20                                                                                                               | 76                       | 337<br>347<br>FL                   | 568—595<br>570—580<br>583—593                      | —<br>22<br>0,5   | —<br>17<br>23                                               |
| Родамин G (родамин Y; в отечественных изданиях родамин 6Ж)               | Etan                   | 530                                      | 558                                      | 82         | —                                                                                                                | —                        | 347<br>FL                          | 574—586<br>580—598                                 | 20<br>0,4        | 16<br>23                                                    |



| Краситель                                                                                                            | Растворитель | $\lambda_{\text{макс}}^{\text{погл}}$ , нм | $\lambda_{\text{макс}}^{\text{люм}}$ , нм | $\eta$ , % | $B_{S_0 \rightarrow S_1}$<br>( $\lambda_{\text{макс}}^{\text{погл}}$ ),<br>Дж $^{-1}$ ·с $^{-1}$ ·см $^3$ | $\tau_{S_1}$ ,<br>10 $^{-10}$ с | $\lambda_{\text{нак}}$ ,<br>нм | $(\lambda_1 - \lambda_2)_{\text{ген}}$ ,<br>нм | $\gamma$ , %    | $K$ ( $\lambda_{\text{нак}}$ ),<br>см $^{-1}$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------|
| N, N'-тетразилпро-<br>дамин (родамин В;<br>родамин С)                                                                | Etan         | 543                                        | 572                                       | 55         | —                                                                                                         | —                               | 337<br>347<br>FL               | 584—612<br>596—616<br>611—624                  | —<br>15<br>0,25 | —<br>15<br>23                                 |
| Родамин 3В (пода-<br>мин 4С)                                                                                         | Etan         | 555                                        | 578                                       | 61         | 20                                                                                                        | 37                              | 347<br>337<br>FL               | 600—624<br>609—632<br>622—632                  | 13<br>—<br>0,3  | 16<br>—<br>23                                 |
| Оксазин 9 (крези-<br>ловый фиолетовый)                                                                               | Etan         | 606                                        | 630                                       | 38         | 20                                                                                                        | 35                              | 337<br>347<br>FL               | 651—689<br>652—684<br>660—700                  | —<br>5<br>0,25  | —<br>7<br>23                                  |
| Нильский голубой                                                                                                     | Etan         | 635                                        | 676                                       | —          | —                                                                                                         | —                               | 337<br>347<br>FL               | 686—714<br>698—720<br>696—720                  | —<br>5<br>0,1   | —<br>8<br>23                                  |
| 1, 1'-дифенил-3,3'-<br>диэтил-5, 5'-дикарбо-<br>этоксид-2, 2'-имидди-<br>карбоцианин иодид<br>(№ 2636 У)             | Etan<br>DMF  | 618<br>—                                   | 652<br>—                                  | 35<br>—    | 63<br>—                                                                                                   | 20<br>—                         | 347<br>347<br>347              | 660—720<br>681—693<br>687—702                  | —<br>8<br>14    | —<br>15<br>3                                  |
| 1, 1'-дифенил-3,3'-<br>диэтил-5, 5'-ди-(бен-<br>зоксазол-2''-ил)-2, 2'-<br>имиддикарбоцианин<br>иодид (№ 1950 У)     | Etan<br>DMF  | 633<br>—                                   | 665<br>—                                  | 40<br>—    | 71<br>—                                                                                                   | 25<br>—                         | 347<br>347                     | 680—740<br>708—720                             | —<br>7          | —<br>6                                        |
| 3,3'-диэтил-2,2'-ок-<br>сатрикарбоцианин ио-<br>дид (DOTC иодид)                                                     | Etan         | 689                                        | 718                                       | 53         | —                                                                                                         | —                               | 694                            | 730—740                                        | 37              | 18                                            |
| 3, 3'-диэтил-6, 7;<br>6', 7'-добензо-10, 12-<br>триметилен-11-хлор-<br>2, 2'-оксатрикарбоци-<br>анин иодид (№ 2780У) | Etan<br>DMF  | 752<br>—                                   | 780<br>—                                  | 13<br>—    | 48<br>—                                                                                                   | 12<br>—                         | 694<br>694                     | 790—825<br>792—822                             | 17<br>30        | 20<br>20                                      |
| 1, 3, 3; 1', 3', 3'-<br>гексаметил-4, 5; 4',<br>5'-добензо-2, 2'-индо-<br>дикарбоцианин иодид<br>(№ 4568)            | Etan<br>EG   | 682<br>—                                   | 720<br>—                                  | 12<br>—    | 56<br>—                                                                                                   | 7<br>—                          | 694<br>694<br>694              | 720—740<br>722—738<br>726—748                  | 25<br>32<br>30  | 20<br>17<br>30                                |
| 1, 3, 3; 1', 3', 3'-<br>гексаметил-2, 2'-индо-<br>трикарбоцианин иодид<br>(НІТС иодид; № 341)                        | Etan         | 744                                        | 770                                       | 28         | 34                                                                                                        | 31                              | 694<br>750                     | 780—826<br>780—826                             | 38<br>45        | 12<br>12                                      |
| 1, 3, 3; 1', 3', 3'-<br>гексаметил-10, 12-три-<br>метилено-11-хлор-2,2'-<br>индотрикарбоцианин<br>иодид (№ 2781)     | Etan<br>DMF  | 742<br>—                                   | 805<br>—                                  | 3<br>—     | 22<br>—                                                                                                   | 2<br>—                          | 694<br>750<br>694              | 816—844<br>816—844<br>816—844                  | 28<br>40<br>33  | 19<br>19<br>19                                |

| Краситель                                                                                              | Растворитель      | $\lambda_{\text{макс погл}}^{\text{нм}}$ | $\lambda_{\text{макс люм}}^{\text{нм}}$ | $\eta, \%$ | $B_{S_0 \rightarrow S_1} \left( \lambda_{\text{макс погл}}^{10^7} \right), \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^3$ | $\tau_{S_1}, 10^{-10} \text{ с}$ | $\lambda_{\text{нак}}^{\text{нм}}$ | $(\lambda_1 - \lambda_2)_{\text{ген}}^{\text{нм}}$ | $\tau, \%$ | $K (\lambda_{\text{нак}})^{\text{см}^{-1}}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------|
| 1, 3, 3; 1', 3', 3'-гексаметил-4, 5; 4', 5'-добензо-2, 2'-индо-трикарбоцианин пер-хлорат (№ 3899)      | Etan<br>DMF<br>EG | 780                                      | 844                                     | 2          | 44                                                                                                                           | 2                                | 694                                | 844—890                                            | 8          | 20                                          |
|                                                                                                        |                   | —                                        | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 844—890                                            | 10         | 20                                          |
|                                                                                                        |                   | —                                        | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 844—890                                            | 17         | 20                                          |
|                                                                                                        |                   | —                                        | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 770                                | 844—890                                            | 17         | 20                                          |
| 1, 1'-добензил-4, 4'-хинокарбоцианин бромид (№ 3963)                                                   | Etan<br>EG<br>DMF | 706                                      | 730                                     | 2          | 55                                                                                                                           | 1                                | 694                                | 740—760                                            | 14         | 15                                          |
|                                                                                                        |                   | 723                                      | 735                                     | 16         | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 740—760                                            | 36         | 15                                          |
|                                                                                                        |                   | —                                        | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 742—762                                            | 30         | 15                                          |
| 1, 1'-ди-(2''-фе-нилэтилен)-4, 4'-хи-нокарбоцианин иодид (№ 3966)                                      | Etan<br>EG<br>DMF | 710                                      | 731                                     | 3          | 65                                                                                                                           | 2                                | 694                                | 740—762                                            | —          | —                                           |
|                                                                                                        |                   | 723                                      | 735                                     | 18         | 60                                                                                                                           | 13                               | 694                                | 740—762                                            | 35         | 18                                          |
|                                                                                                        |                   | —                                        | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 742—764                                            | 33         | 18                                          |
| Дибензцианин С 1056                                                                                    | Etan              | 687                                      | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 766—780                                            | 10         | 18                                          |
| 1, 1'-диметил-2, 2'-ди-(3'', 4''-диме-токсифенил)-5, 6; 5', 6'-добенз-4, 4'-хино-карбоцианин иодид     | Etan              | 750                                      | 793                                     | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 820—854                                            | 18         | 18                                          |
| 1, 1'-диметил-2, 2'-ди-(4''-метоксифе-нил)-5, 6; 5', 6'-ди-бенз-4, 4'-хинокар-боцианин иодид           | DMF               | 768                                      | 793                                     | 3          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 853—874                                            | 35         | 18                                          |
| 1, 1'-диметил-2, 2'-ди-(4''-хлор-фенил)-5, 6; 5', 6'-добенз-4, 4'-хинокар-боцианин иодид               | DMF               | 764                                      | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 860—906                                            | 19         | 15                                          |
|                                                                                                        |                   |                                          |                                         |            |                                                                                                                              |                                  | 694                                | 882—914                                            | 14         | 30                                          |
| 1, 1'-диметил-2, 2'-ди-(3'', 4''-мети-лен диоксифенил)-5, 6; 5', 6'-добенз-4, 4'-хинокарбоцианин иодид | Etan              | 768                                      | 800                                     | 3          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 874—883                                            | 35         | 18                                          |
| 1, 1'-диэтил-2, 2'-хинотрикарбоцианин иодид (№ 100)                                                    | Etan<br>DMF       | 823                                      | 885                                     | 0,7        | 80                                                                                                                           | 0,4                              | 694                                | 860—920                                            | 11         | 14                                          |
|                                                                                                        |                   | —                                        | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 820                                | 860—920                                            | 32         | 14                                          |
|                                                                                                        |                   | —                                        | —                                       | —          | —                                                                                                                            | —                                | 694                                | 860—920                                            | 19         | 14                                          |

| Краситель                                                                                                                                              | Растворитель | $\lambda_{\text{макс погл}} \text{ нм}$ | $\lambda_{\text{макс люм}} \text{ нм}$ | $\eta, \%$ | $\frac{B_{S_0 \rightarrow S_1}}{\left(\lambda_{\text{макс погл}}\right)},$<br>$\text{Дж}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^3$ | $\tau_{S_1} \cdot 10^{-10} \text{ с}$ | $\lambda_{\text{нак}} \text{ нм}$ | $(\lambda_1 - \lambda_2)_{\text{ген}} \text{ нм}$ | $\tau, \%$ | $K (\lambda_{\text{нак}})^{\circ}, \text{ см}^{-1}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------|
| 3, 3'-диэтил-4, 5; 4', 5'-ди-(5''-фенил-тиофено-2'', 3'')-2,2'-тиазолодикарбоцианин иодид (№ 4201)                                                     | Etan         | 730                                     | 780                                    | 9          | 43                                                                                                                                   | 6                                     | 694                               | 780—810                                           | 12         | 19                                                  |
|                                                                                                                                                        | DMF          | —                                       | —                                      | —          | —                                                                                                                                    | —                                     | 730                               | 780—810                                           | 19         | 19                                                  |
|                                                                                                                                                        |              |                                         |                                        |            |                                                                                                                                      |                                       | 694                               | 784—814                                           | 17         | 19                                                  |
| 3, 3'-диэтил-4-кет-5-[(3-этиленбенз-тиазолинилиден-2)-1, 3-(2,2-диметилтриметилено)-бутенилидем]-7-этоксн-2, 2'-тиазолиннотиакробоцианин бромид (4197) | Etan         | 725                                     | 800                                    | 0,5        | 27                                                                                                                                   | 0,3                                   | 694                               | 824—866                                           | 24         | 10                                                  |
|                                                                                                                                                        | DMF          | —                                       | —                                      | —          | —                                                                                                                                    | —                                     | 730                               | 824—866                                           | 32         | 10                                                  |
|                                                                                                                                                        |              |                                         |                                        |            |                                                                                                                                      |                                       | 694                               | 824—866                                           | 7          | 10                                                  |
| 3, 3'-диэтил-9, 11-(о-фенилено)-2, 2'-тиадикарбоцианин иодид (№ 3734)                                                                                  | Etan         | 760                                     | 815                                    | 2          | 31                                                                                                                                   | 3                                     | 694                               | 822—864                                           | 15         | 18                                                  |
|                                                                                                                                                        | DMF          | —                                       | —                                      | —          | —                                                                                                                                    | —                                     | 730                               | 822—864                                           | 24         | 18                                                  |
|                                                                                                                                                        |              |                                         |                                        |            |                                                                                                                                      |                                       | 694                               | 822—864                                           | 23         | 18                                                  |
| 3, 3'-диэтил-2, 2'-тиатрикарбоцианин иодид (DTTC иодид; № 286)                                                                                         | Etan         | 763                                     | 790                                    | 34         | 74                                                                                                                                   | 25                                    | 694                               | 800—830                                           | 22         | 19                                                  |
|                                                                                                                                                        |              |                                         |                                        |            |                                                                                                                                      |                                       | 750                               | 800—830                                           | 42         | 19                                                  |
| 3, 3'-диэтил-2, 2'-тиатрикарбоцианин бромид (DTTC бромид)                                                                                              | Etan         | 765                                     | —                                      | —          | —                                                                                                                                    | —                                     | 694                               | 820—838                                           | 21         | 18                                                  |
| 3, 3'-диэтил-2, 2'-тиатетракарбоцианин иодид (№ 440)                                                                                                   | Etan         | 865                                     | 940                                    | 0,3        | 46                                                                                                                                   | 0,3                                   | 694                               | 946—980                                           | 25         | 18                                                  |
|                                                                                                                                                        | DMF          |                                         |                                        |            |                                                                                                                                      |                                       | 820                               | 946—980                                           | 49         | 18                                                  |
|                                                                                                                                                        |              |                                         |                                        |            |                                                                                                                                      |                                       | 694                               | 946—980                                           | 24         | 18                                                  |
| Нильский голубой А-оксазон; (9-диэтил-аминобензо [a] феноксазинон-5; оксазин 17)                                                                       | Etan         | 550                                     | 640                                    | —          | —                                                                                                                                    | —                                     | FL                                | 659—672                                           | 0,2        | 23                                                  |
| Родамин 19                                                                                                                                             | Etan         | 514                                     | 538                                    | —          | —                                                                                                                                    | —                                     | FL                                | 564—573                                           | 0,2        | 23                                                  |

Для возбуждения растворов красителей в импульсном режиме чаще всего используются рубиновый (694 нм, основная частота и вторая гармоника), неодимовый (1060 нм, основная частота, вторая, третья и четвертая гармоники), азотный (337 нм) и ксеноновый (172,5 нм) импульсные лазеры. Генерация может быть осуществлена практически при любой длине волны в диапазоне от 340 до 1100 нм при КПД, достигающем десятков процентов. Ширина спектра составляет 5—50 нм

при отсутствии дисперсионных элементов в резонаторе и  $10^{-2}$ — $10^{-4}$  нм в дисперсионном резонаторе.

Наиболее распространенным источником накачки лазеров на красителях в непрерывном режиме является аргоновый лазер, мощность излучения которого составляет несколько ватт на линиях в синей и зеленой областях спектра. Излучение аргонового лазера фокусируется в область с размерами 10—20 мкм для превышения порога генерации. Для устранения термооптических иска-

жений, а также для выведения из зоны генерации продуктов фотораспада применяется прокачка красителя, чтобы за несколько микросекунд произвести полную смену красителя в активной области. Лазер на красителе с непрерывной накачкой может работать в режиме активной или пассивной синхронизации мод, причем в последнем режиме возможно получение импульсов длительностью  $\Delta t \leq 10^{-12}$  с.

Для перестройки и сужения спектра генерации в лазерах на красителях используются дисперсионные светофильтры и призмы, интерферометры Фабри — Перо, дифракционные решетки, а также селективные элементы, работающие на принципе распределенной обратной связи. В РОС-лазерах обратная связь осуществляется за счет брэгговского отражения излучения от периодической структуры, возникающей в активной среде в результате модуляции ее показателя преломления. Введение одного селектирующего элемента сужает спектр генерации примерно до 1 нм без существенного снижения выходной мощности. Получение более узких линий достигается за счет комбинации нескольких селекторов и сопряжено со значительными потерями выходной мощности.

Более подробные сведения о лазерах на красителях можно найти в обзорах [61—62].

#### 34.8. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ

Твердотельные лазеры на центрах окраски в ионных кристаллах обладают: широкой областью длин волн генерации 0,7—3,3 мкм, высокой стабильностью частоты и малой шириной генерируемого спектра, возможностью работы в импульсно-периодическом и непрерывном режимах, высоким КПД.

Исходным лазерным материалом являются кристаллы фторидов и хлоридов щелочных металлов, а также фториды кальция и стронция. Используются также кристаллы с примесью. Воздействие на кристаллы ионизирующих излучений ( $\gamma$ -квантов, электронов высоких энергий, рентгеновского и коротковолнового ультрафиолетового излучений) или прокалка кристаллов в парах щелочного металла приводит к возникновению точечных дефектов кристаллической решетки, локализующих на себе электроны или дырки. Стимулированное излучение возникает на электронно-колебательных переходах в таких образованиях. Схема генерации центров окраски аналогична схемам лазеров на красителе.

Все представленные в табл. 34.8 непрерывные лазеры, за исключением четырех отмеченных (300 K), работают при температуре жидкого азота. Импульсные лазеры работают при  $T = 20^\circ \text{C}$ .

Более подробную информацию о лазерах на центрах окраски можно найти в [2, 63, 64].

Таблица 34.10. Лазеры на центрах окраски в ионных кристаллах [63]

| Кристалл                  | Тип центра              | Длина волны накачки, мкм | Область перестройки, мкм | КПД, % |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|
| <i>Непрерывные лазеры</i> |                         |                          |                          |        |
| KCl — Li                  | $F_A$ (II)              | 0,514<br>0,647           | 2,3—2,95                 | 9,1    |
| RbCl — Li                 | $F_A$ (II)              | 0,647<br>0,676<br>0,753  | 2,5—3,33                 | 2,5    |
| KCl — Na                  | $F_B$ (II)              | 0,47<br>0,53<br>0,568    | 2,25—2,65                | 2,3    |
| RbCl — Na                 | $F_B$ (II)              | 0,647<br>0,676           | 2,5—2,9                  | 2,1    |
| NaF                       | $F_2^+$                 | 0,753                    | 0,89—1,0                 | 10     |
| LiF                       | (P) (77 K)              | 0,647                    | 0,82—1,07                | 60     |
|                           | $F_2^+$ (300 K)         | —                        | 0,86—1,0                 | 10     |
| KF                        | $F_2^+$                 | 1,064                    | 1,22—1,5                 | 46     |
| KCl                       | $F_2^+$                 | 1,34                     | 1,6—1,78                 | —      |
| NaCl                      | $F_2^+$                 | 1,064                    | 1,35—1,6                 | —      |
| LiF                       | $F_2^-$ (300 K)         | 1,064                    | 1,14—1,2                 | 2      |
| NaCl — OH <sup>-</sup>    | $F_2^+$                 | 1,06                     | 1,36—1,77                | —      |
| KCl — OH <sup>-</sup>     | $F_2^+$                 | 1,32<br>1,34             | 1,61—1,77                | —      |
| KCl — Na                  | $(F_2^+)_A$             | 1,32<br>1,34             | 1,62—1,91                | 4      |
| KCl — Li                  | $(F_2^+)_A$             | 1,32<br>1,34             | 2,0—2,5                  | 7      |
| CaF <sub>2</sub> — Na     | $(F_2)_A$ (300 K)       | 0,61                     | 0,72—0,84                | —      |
| SrF <sub>2</sub> — Na     | $(F_2)_A$ (300 K)       | 0,694                    | 0,84—0,98                | —      |
| NaF                       | $(F_2^+)$               | 0,87                     | 0,99—1,22                | 40     |
| NaF                       | $(F_2^+)$               | 0,9                      | 1,08—1,38                | 34     |
| <i>Импульсные лазеры</i>  |                         |                          |                          |        |
| LiF                       | $F_2$                   | 0,45                     | 0,665—0,715              | 10     |
| LiF                       | $F_2$                   | 0,53                     | 0,65—0,75                | —      |
| LiF                       | $F_2 \rightarrow F_2^+$ | 0,53                     | 0,84—1,1                 | 30     |
| LiF — OH <sup>-</sup>     | $F_2^+$                 | 0,69                     | 0,84—1,02                | 6,5    |
| LiF                       | $F_2^-$                 | 1,06                     | 1,08—1,23                | 25     |
| NaF — Li                  | $(F_2^+)_A$             | 0,69                     | 0,95—1,3                 | 30     |
| NaF                       | $F_3$                   | 0,96                     | 1,15—1,4                 | 17     |

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник по лазерам**/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1.
2. **Карлов Н. В.** Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983.
3. **Handbook of Lasers**/Ed. by R. J. Pressley. Cleveland, Chemical Rubber Comp., 1971.
4. **Карлов Н. В.** //Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 8—11.
5. **Beck R., Englisch W., Gürs K.** Table of Laser Lines in Gases and Vapors. 3rd. Berlin — Heidelberg — N. Y.: Springer-Verlag, 1980. Vol. 2.
6. **Аблеков В. К., Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н.** Справочник по газодинамическим лазерам. М.: Машиностроение, 1982.
7. **Таблицы физических величин: Справочник**/Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
8. **Tittel F. K., Wilson W. L., Stickle R. E. et al.** //Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. P. 405—413.
9. **Tittel F. K., Marowcky G., Wilson W. L., Williams R. A.** //Ibid. 1980. Vol. 37. P. 862—875.
10. **Каминский А. А., Мак А. А., Пашинин П. П.** и др. //Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 237—324.
11. **Жариков Е. В., Ильичев Н. Н., Лаптев В. В.** и др. //Квантовая электроника. 1983. Т. 10, № 1. С. 140—149.
12. **Walling John C.** //Laser Focus. 1982. Vol. 18, № 2. P. 45—50.
13. **Жариков Е. В., Ильичев Н. Н., Калитин С. П.** Препринт ФИАН № 20. М., 1983.
14. **Каминский А. А.** Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975.
15. **Klein P. B., Gurneaux J. E., Henry R. L.** //Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42, № 8. P. 638—640.
16. **Künzel W., Dügg U.** //Appl. Phys. 1982. Vol. 328, № 2—3. P. 233—234.
17. **Johnson L. F., Guggenheim H. J., Bahnh D.** //Opt. Lett. 1983. Vol. 8, № 7. P. 371—373.
18. **Ehrlich D. J., Moulton P. F., Osgoood R. M.** //Ibid. 1980. Vol. 5, № 8. P. 339—341.
19. **Ehrlich D. J.** //Top. Meet. Excim. Lasers. Digest Techn. Pap. Charleston, S. C. N. Y. 1979. P. Tn A<sup>4</sup>/<sub>1</sub>—Tn A<sup>4</sup>/<sub>4</sub>.
20. **Каминский А. А.** //Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, № 6. С. 1357—1359.
21. **Allen P.** //Rare Earths Modern Science and Technology. N. Y. — Lond.: Plenum Press, 1978. P. 527—532.
22. **Hegarty J., Yen W. M.** //J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, № 7. P. 3545—3547.
23. **Kaminskii A. A., Petrosyan A. G., Ovanesyan K. L.** //Phys. status solidi (a). 1983. Vol. 77. № 2. P. K 173—K 178.
24. **Kaminskii A. A., Asamalyan N. R., Denisenko G. A.** //Phys. status solidi, 1982. Vol. A. 70, № 2. P. 397—406.
25. **Каминский А. А.** //Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер. 1979. Т. 15, № 11. С. 2092.
26. **Lempicki A., McCollum B. C., Chinn S. R.** //IEEE J. Quant. Electr. 1979. Vol. 15, № 9. 896—903.
27. **Каминский А. А., Мнль Б. В., Сильвестрова И. М.** //Изв. АН СССР. Сер. физ. 1983. Т. 47, № 10. С. 1903—1909.
28. **Garmash W. M., Kaminskii A. A., Polyakov N. I.** //Phys. status solidi(a). 1983. Vol. 75, № 2. P. K111—K116.
29. **Каминский А. А., Тимофеева В. А., Агамалян Н. В.** и др. //Кристаллография. 1982. Т. 27, № 3. С. 522—527.
30. **Budin J. P., Michel J. C., Auzel F.** //J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, № 2. P. 641—645.
31. **Дианов Е. М., Дмитрук М. В., Карасик А. Я.** //Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 10. С. 2105—2111.
32. **Каминский А. А., Кюрстен Г. Д., Шульте Д.** и др. //Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 6. С. 1373—1376.
33. **Казаков Б. Н., Орлов М. С., Петров М. В.** и др. //Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 47, № 6. С. 1217—1219.
34. **Каминский А. А., Петросян А. Г., Федоров В. А.** и др. //Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1981. Т. 17, № 10. С. 1920—1922.
35. **Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Butaeva T. I.** //Phys. status solidi. 1979. Vol. 56, № 2. P. 725—736.
36. **Каминский А. А., Федоров В. А., Петросян А. Г.** и др. //Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1979. Т. 15, № 8. С. 1494—1495.
37. **Каминский А. А.** //Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 1. С. 64—67.
38. **Каминский А. А., Петросян А. Г., Ованесян К. Л.** //Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1983. Т. 119, № 7. С. 1217—1219.
39. **Cockayne B.** //J. Cryst. Growth. 1981. Vol. 54, № 3. P. 407—413.
40. **Каминский А. А.** //Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1982. Т. 18, № 3. С. 482—497.
41. **Антипейко Б. М., Мак А. А., Синицын Б. В.** и др. //Журн. техн. физ. 1982. Т. 52, № 3. С. 521—522.
42. **Каминский А. А.** //Кристаллография. 1982. Т. 27, № 1. С. 193—195.
43. **Mochalow I. V.** //Phys status solidi (a). 1979. Vol. 55, № 1. P. 79—87.
44. **Каминский А. А., Петросян А. Г.** //Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1982. Т. 18, № 11. С. 1910—1911.
45. **Каминский А. А., Павлюк А. А., Бутаева Т. И.** и др. //Там же. 1979. Т. 15, № 3. С. 541—542.
46. **Каминский А. А., Павлюк А. А., Агапалян Н. Р.** и др. //Там же. Т. 15, № 8. С. 1496—1497.
47. **Каминский А. А., Саркисов С. Э., Сейтранян К. Б.** и др. //Там же. 1982. Т. 18, № 3. С. 527—528.
48. **Каминский А. А., Сейтранян К. Б., Аракелян А. З.** и др. //Там же. Т. 18, № 6, С. 1061—1063.
49. **Каминский А. А., Петросян А. Г.** //Там же. Т. 18, № 11. С. 1910—1911.
50. **Каминский А. А.** //Там же. 1983. Т. 19, № 8. С. 1388—1391.
51. **Авакянц Л. И., Бужинский И. М., Корягина Е. И., Суркова В. Ф.** //Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 4. С. 725—752.
52. **Бужинский И. М., Дианов Е. М., Мак А. А.** //Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 329—334.
53. **Лазерные фосфатные стекла**/Н. Е. Алексеев, В. П. Гапонцев, М. Е. Жаботинский и др. М.: Наука, 1980.
54. **Елисеев П. Г.** //Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 334—342.
55. **Елисеев П. Г.** Полупроводниковые лазеры и преобразователи. М.: ВИНТИ, 1978. (Итоги науки и техники. Радиотехника. Т. 14, ч. 1.)
56. **Долгиннов Л. М., Елисеев П. Г., Исманлов И.** //Инжекционные излучательные приборы на основе многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов. М.: ВИНТИ, 1980. С. 3—115. (Итоги науки и техники. Радиотехника. Т. 21).
57. **Инжекционные лазеры.** М.: Наука, 1983. (Тр. ФИАН. Т. 141).
58. **Кейси Х., Паниш М.** Лазеры на гетероструктурах: Пер. с англ./Под ред. П. Г. Елисеева. М.: Мир, 1981. Т. 1, 2.

59. Thompson G. H. B. Physics of Semiconductor Laser Devices. Chichester — N. Y. — Brisbane — Toronto: John Wiley and Sons, 1980.

60. Елисеев П. Г. // Электронная промышленность. 1980. № 8—9. С. 50.

61. Степанов Б. И., Рубинов А. Н., Мостовников В. А. // Справочник по лазерам / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 360—379.

62. Каталог активных лазерных сред на основе рас-

творов органических красителей и родственных соединений / Под ред. Б. И. Степанова. Минск: Ин-т физики АН БССР, 1977.

63. Басиев Т. Т., Воронько Ю. К., Мирон С. Б. и др. // Изв. АН СССР, Сер. физ. 1982. Т. 46. С. 1600—1610.

64. Феофилов П. П., Архангельская В. А. // Там же. 1981. Т. 45. С. 302—308.

## Глава 35

# РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Р. М. Иمامов

## 35.1. ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновским излучением называют электромагнитные колебания с длиной волны  $\lambda$  от  $10^{-3}$  до  $10$  нм. Чрезвычайно малые длины волн рентгеновского излучения, сопоставимые с межатомными расстояниями в твердых и жидких телах, обуславливают своеобразные свойства этого излучения. Показатель преломления рентгеновского излучения определяется выражением

$$q = 1 - e^2 N \lambda^2 / (2 m c^2 \pi),$$

где  $N$  — число электронов в  $1 \text{ см}^3$ ;  $\lambda$  — длина волны, см;  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона.

Так как  $e^2/(m c^2) = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ ,  $\lambda^2 \approx 10^{-16} \text{ см}^2$ ,  $N \approx 10^{23} \div 10^{25} \text{ см}^3$ , то порядок второго члена в выражении для  $q$  меньше  $10^{-4}$ . Таким образом, для рентгеновского излучения  $q$  меньше единицы, хотя и мало отличается от нее.

Ввиду близости  $q$  к единице рентгеновское излучение фокусировать с помощью линз и призм практически невозможно. В рентгеновской оптике пучки формируют чаще всего с помощью диафрагм либо зеркал с полным внешним отражением. Используются также дифракционные методы фокусировки пучков.

Источником рентгеновского излучения служит электронная рентгеновская трубка. В ней электроны, испускаемые накалимым катодом (вольфрамовой нитью или спиралью), ускоряются электрическим полем и направляются на металлический анод. Энергия электронов при их резком торможении в веществе анода преобразуется в фотоны рентгеновского излучения:

$$E_{\text{фотона}} = h\nu = E_1 - E_2,$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $\nu$  — частота излучения;  $E_1$  и  $E_2$  — энергия электронов соответственно до и после соударения с анодом. Возникающее излучение состоит обычно из тормозной и характеристической составляющих. Максимальная частота  $\nu_{\text{max}}$  или минимальная длина волны  $\lambda_{\text{min}}$  соответствует полной остановке электронов ( $E_2 = 0$ ):

$$h\nu_{\text{max}} = hc/\lambda_{\text{min}} = E_1 = eU,$$

где  $U$  — ускоряющее напряжение, кВ;  $\lambda_{\text{min}} = 1,24/U$ , нм.

Поскольку  $E_2$  может принимать любое значение, меньшее  $E_1$ , то непрерывный спектр со стороны длинных волн ограничен лишь поглощением длинноволнового излучения в материале окна трубки и в воздухе. Максимальной интенсивности в сплошном спектре соответствует длина волны спектра  $\lambda \approx 1,5 \lambda_{\text{min}}$ .

В качестве мощного источника рентгеновского излучения в последнее время используют синхротронное, или магнитотормозное, излучение, возникающее при движении релятивистских заряженных частиц в однородном магнитном поле. Спектр синхротронного излучения практически непрерывно заполняет диапазон от инфракрасного до высокоэнергетического рентгеновского излучения. Направление излучения совпадает с мгновенной скоростью заряженной частицы и сосредоточено в конусе с углом раствора  $\theta \approx E/(m c^2)$ , где  $E$  — энергия заряженной частицы,  $m$  — ее масса,  $c$  — скорость света.

Для измерения энергии рентгеновского излучения согласно РД 50-454—84 рекомендуется применять внесистемную единицу электрон-вольт. В соответствии с ГОСТ 8.417—81 единица электрон-вольт и десятичные кратные ей единицы допускаются к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ:

$$\lambda = \frac{1}{\nu} = hc/E;$$

$$E(\lambda = 1 \text{ нм}) = hc/10^{-9} \text{ м} = 1239,851 \text{ 9 (32) эВ};$$

$$\lambda(E = 1 \text{ эВ}) = hc/1 \text{ эВ} = 1239,851 \text{ 9 (32) нм}.$$

Ниже приведены соотношения между рекомендованными и внесистемными единицами:

$$1 \text{ кХ} = 0,100202 \text{ нм};$$

$$1 \text{ Ry} = 13,605802 \text{ эВ};$$

$$\tilde{\nu}(E = 1 \text{ эВ}) = 1 \text{ эВ}/hc = 8065,479 \text{ см}^{-1}.$$

## 35.2. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ СПЕКТР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Характеристический спектр возникает при определенном ускоряющем напряжении  $U$ , зависящем от атомного номера  $Z$  материала анода. Появление характеристического спектра легко объяснить на основании квантовомеханических представлений о строении атома.

Ускоренные в трубке электроны могут «выбить» тот или иной внутренний электрон атома анода. Возникновение электронной вакансии переводит атом в возбужденное состояние. Возвращение атома в невозбужденное состояние сопровождается выделением избытка энергии в виде кванта рентгеновского излучения  $h\nu = E_1 - E_0$ , где  $E_1$  — энергия электронов внешних оболочек, а  $E_0$  — энергия электронов внутренних оболочек.

В рентгеновской спектроскопии приняты следующие

обозначения [1]. Термы уровней атома, для которых главное квантовое число равно 1, 2, 3, 4, 5 и 6, обозначаются соответственно буквами *K, L, M, N, O, P*.

Индексы у этих букв соответствуют разным значениям орбитального и полного момента электрона согласно схеме:

| Уровень электрона в атоме | 1s       | 2s                   | 2p <sub>1/2</sub>     | 2p <sub>3/2</sub>      | 3s                   | 3p <sub>1/2</sub>     | 3p <sub>3/2</sub>      | 3d <sub>3/2</sub>     | 3d <sub>5/2</sub>    | и т. д. |
|---------------------------|----------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|---------|
| Терм уровня               | <i>K</i> | <i>L<sub>I</sub></i> | <i>L<sub>II</sub></i> | <i>L<sub>III</sub></i> | <i>M<sub>I</sub></i> | <i>M<sub>II</sub></i> | <i>M<sub>III</sub></i> | <i>M<sub>IV</sub></i> | <i>M<sub>V</sub></i> | и т. д. |

Линии, соответствующие переходам электрона в атоме на *K-, L-, M-, N-*оболочки, образуют *K-, L-, M-, N-*серии рентгеновского излучения. Линии, возникающие при переходах по такой простой диаграмме уровней, называют диаграммными линиями.

Частота какой-либо линии  $\nu$ , Гц, изменяется при переходе от одного элемента к другому по закону Мозли:

$$\nu \approx R_{\infty} c (Z - \sigma)^2 (n_0^{-2} - n_1^{-2})$$

где  $R_{\infty} = 109737,3 \text{ см}^{-1}$  — постоянная Ридберга;  $c$  — скорость света;  $n$  — главное квантовое число (здесь индекс 0 относится к конечному, а 1 — к исходному состоянию электрона);  $\sigma$  — постоянная экранирования.

При постоянном анодном токе интенсивность характеристического излучения  $I_c$  растет пропорционально  $(U - U_{кр})^{3/2}/U$ , где  $U_{кр}$  — порог возбуждения линии. Максимум отношения интенсивности характеристического излучения к интенсивности сплошного спектра достигается при  $U = 3 U_{кр}$ .

Т а б л и ц а 35.1. Обозначение диаграммных линий рентгеновского излучения [2]

| <i>K</i> -серия                       |                | <i>L</i> -серия                                   |               | <i>M</i> -серия                                      |              |
|---------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------|--------------|
| Переход                               | Индекс линии   | Переход                                           | Индекс линии  | Переход                                              | Индекс линии |
| <i>K</i> — <i>L<sub>II</sub></i>      | $\alpha_2$     | <i>L</i> — <i>M<sub>II</sub></i>                  | $\beta_4$     | <i>L<sub>II</sub></i> — <i>O<sub>IV</sub></i>        | $\gamma_6$   |
| <i>K</i> — <i>L<sub>III</sub></i>     | $\alpha_1$     | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>M<sub>III</sub></i>     | $\beta_3$     | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>M<sub>I</sub></i>        | $l$          |
| <i>K</i> — <i>M<sub>II</sub></i>      | $\beta_3$      | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>M<sub>IV</sub></i>      | $\beta_{10}$  | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>M<sub>II</sub></i>       | —            |
| <i>K</i> — <i>M<sub>III</sub></i>     | $\beta_1$      | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>M<sub>V</sub></i>       | $\beta_9$     | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>M<sub>III</sub></i>      | $s$          |
| <i>K</i> — <i>M<sub>IV</sub></i>      | $\beta_5^{II}$ | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>N<sub>II</sub></i>      | $\gamma_2$    | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>M<sub>IV</sub></i>       | $\alpha_2$   |
| <i>K</i> — <i>M<sub>V</sub></i>       | $\beta_5^I$    | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>N<sub>III</sub></i>     | $\gamma_3$    |                                                      |              |
| <i>K</i> — <i>M<sub>IV, V</sub></i>   | $\beta_5$      | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>O<sub>II</sub></i>      | $\gamma_4'$   | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>M<sub>V</sub></i>        | $\alpha_1$   |
| <i>K</i> — <i>N<sub>II</sub></i>      | $\beta_2^{II}$ | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>O<sub>III</sub></i>     | $\gamma_4$    | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>N<sub>I</sub></i>        | $\beta_6$    |
|                                       |                | <i>L<sub>I</sub></i> — <i>P<sub>II, III</sub></i> | $\gamma_{13}$ |                                                      |              |
| <i>K</i> — <i>N<sub>III</sub></i>     | $\beta_2^I$    | <i>L<sub>II</sub></i> — <i>M<sub>I</sub></i>      | $\eta$        | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>N<sub>IV</sub></i>       | $\beta_{15}$ |
| <i>K</i> — <i>N<sub>II, III</sub></i> | $\beta_2$      | <i>L<sub>II</sub></i> — <i>M<sub>IV</sub></i>     | $\beta_1$     | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>N<sub>V</sub></i>        | $\beta_2$    |
| <i>K</i> — <i>N<sub>IV</sub></i>      | $\beta_{4x}$   | <i>L<sub>II</sub></i> — <i>N<sub>I</sub></i>      | $\gamma_5$    | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>N<sub>VI, VII</sub></i>  | $\beta_7'$   |
| <i>K</i> — <i>N<sub>V</sub></i>       | $\beta_4$      | <i>L<sub>II</sub></i> — <i>N<sub>IV</sub></i>     | $\gamma_1$    | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>O<sub>I</sub></i>        | $\beta_7$    |
|                                       |                | <i>L<sub>II</sub></i> — <i>O<sub>I</sub></i>      | $\gamma_8$    | <i>L<sub>III</sub></i> — <i>O<sub>IV, V</sub></i>    | $\beta_5$    |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>III</sub></i> — <i>N<sub>V</sub></i>        |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>IV</sub></i> — <i>N<sub>III</sub></i>       |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>IV</sub></i> — <i>N<sub>VI, V, II</sub></i> |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>IV</sub></i> — <i>O<sub>II, OIII</sub></i>  |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>V</sub></i> — <i>N<sub>II</sub></i>         |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>V</sub></i> — <i>N<sub>III</sub></i>        |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>V</sub></i> — <i>N<sub>II, III</sub></i>    |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>V</sub></i> — <i>N<sub>VI</sub></i>         |              |
|                                       |                |                                                   |               | <i>M<sub>V</sub></i> — <i>N<sub>VII</sub></i>        |              |

# 35.3 ДЛИНА ВОЛНЫ ОСНОВНЫХ ЛИНИЙ И КРАЕВ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Таблица 35.2 Длина волны диаграммных линий [3] при начальном уровне K

| Элемент          | Длина волны $\lambda$ , нм, при конечном уровне |            |            |           |           |                |             | Край поглощения |
|------------------|-------------------------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|----------------|-------------|-----------------|
|                  | $L_I$                                           | $L_{II}$   | $L_{III}$  | $M_{II}$  | $M_{III}$ | $M_{IV}$       | $M_V$       |                 |
|                  | —                                               | $\alpha_2$ | $\alpha_1$ | $\beta_3$ | $\beta_1$ | $\beta_5^{II}$ | $\beta_5^I$ |                 |
| <sup>3</sup> Li  | —                                               | 22,8       | —          | —         | —         | —              | —           | 22,65           |
| <sup>4</sup> Be  | —                                               | 11,4       | —          | —         | —         | —              | —           | 11,10           |
| <sup>5</sup> B   | —                                               | 6,76       | —          | —         | —         | —              | —           | —               |
| <sup>6</sup> C   | —                                               | 4,47       | —          | —         | —         | —              | —           | 4,368           |
| <sup>7</sup> N   | —                                               | 3,16       | —          | —         | —         | —              | —           | 3,099           |
| <sup>8</sup> O   | —                                               | 2,362      | —          | —         | —         | —              | —           | 2,332           |
| <sup>9</sup> F   | —                                               | 1,832      | —          | —         | —         | —              | —           | 1,800           |
| <sup>10</sup> Ne | —                                               | 1,461      | —          | 1,445     | —         | —              | —           | 1,430           |
| <sup>11</sup> Na | —                                               | 1,1910     | —          | 1,1575    | —         | —              | —           | 1,1569          |
| <sup>12</sup> Mg | —                                               | 0,9890     | —          | 0,9521    | —         | —              | —           | 0,9512          |
| <sup>13</sup> Al | —                                               | 0,8342     | 0,8339     | 0,7961    | —         | —              | —           | 0,7948          |
| <sup>14</sup> Si | —                                               | 0,7128     | 0,7125     | 0,6753    | —         | —              | —           | 0,6738          |
| <sup>15</sup> P  | —                                               | 0,6160     | 0,6157     | 0,5796    | —         | —              | —           | 0,5784          |
| <sup>16</sup> S  | —                                               | 0,5375     | 0,5372     | 0,5032    | —         | —              | —           | 0,5019          |
| <sup>17</sup> Cl | —                                               | 0,4731     | 0,4728     | 0,4403    | —         | —              | —           | 0,4397          |
| <sup>18</sup> Ar | —                                               | 0,4195     | 0,4192     | 0,3886    | —         | —              | —           | 0,3871          |
| <sup>19</sup> K  | —                                               | 0,3745     | 0,3741     | 0,3454    | —         | 0,3441         | —           | 0,3437          |
| <sup>20</sup> Ca | —                                               | 0,3362     | 0,3358     | 0,3090    | —         | 0,3075         | —           | 0,3070          |
| <sup>21</sup> Sc | —                                               | 0,3034     | 0,3031     | 0,2780    | —         | 0,2763         | —           | 0,2762          |
| <sup>22</sup> Ti | —                                               | 0,2752     | 0,2749     | 0,2514    | —         | 0,2499         | —           | 0,2497          |
| <sup>23</sup> V  | —                                               | 0,2507     | 0,2504     | 0,2284    | —         | 0,2270         | —           | 0,2269          |
| <sup>24</sup> Cr | —                                               | 0,2294     | 0,2290     | 0,2085    | —         | 0,2071         | —           | 0,2070          |
| <sup>25</sup> Mn | —                                               | 0,2106     | 0,2102     | 0,1910    | —         | 0,1897         | —           | 0,1896          |
| <sup>26</sup> Fe | —                                               | 0,1940     | 0,1936     | 0,1757    | —         | 0,1744         | —           | 0,1743          |
| <sup>27</sup> Co | —                                               | 0,1793     | 0,1789     | 0,1621    | —         | 0,1609         | —           | 0,1608          |
| <sup>28</sup> Ni | —                                               | 0,1662     | 0,1658     | 0,1500    | —         | 0,1489         | —           | 0,1488          |
| <sup>29</sup> Cu | —                                               | 0,1544     | 0,1541     | 0,1392    | —         | 0,1382         | —           | 0,1381          |
| <sup>30</sup> Zn | —                                               | 0,1439     | 0,1435     | 0,1295    | —         | 0,1285         | —           | 0,1283          |
| <sup>31</sup> Ga | —                                               | 0,1344     | 0,1340     | 0,1208    | 0,1207    | 0,1198         | —           | 0,1196          |
| <sup>32</sup> Ge | —                                               | 0,1258     | 0,1254     | 0,1129    | 0,1128    | 0,1119         | —           | 0,1117          |
| <sup>33</sup> As | —                                               | 0,1180     | 0,1176     | 0,1058    | 0,1057    | 0,1049         | —           | 0,1045          |
| <sup>34</sup> Se | —                                               | 0,1109     | 0,1105     | 0,0993    | 0,0992    | 0,0984         | —           | 0,0980          |
| <sup>35</sup> Br | —                                               | 0,1044     | 0,1040     | 0,0933    | 0,0932    | 0,0926         | —           | 0,0920          |
| <sup>36</sup> Kr | —                                               | 0,0984     | 0,0980     | 0,0879    | 0,0878    | 0,0871         | —           | 0,0866          |
| <sup>37</sup> Rb | —                                               | 0,0930     | 0,0926     | 0,0829    | 0,0828    | 0,0822         | —           | 0,0816          |
| <sup>38</sup> Sr | —                                               | 0,0879     | 0,0875     | 0,0783    | 0,0782    | 0,0776         | —           | 0,0770          |
| <sup>39</sup> Y  | —                                               | 0,0833     | 0,0829     | 0,0741    | 0,0740    | 0,0735         | —           | 0,0728          |
| <sup>40</sup> Zr | —                                               | 0,0790     | 0,0786     | 0,0702    | 0,0701    | 0,0696         | —           | 0,0689          |
| <sup>41</sup> Nb | —                                               | 0,0750     | 0,0746     | 0,0666    | 0,0665    | 0,0660         | —           | 0,0653          |
| <sup>42</sup> Mo | —                                               | 0,0714     | 0,0709     | 0,0633    | 0,0632    | 0,0627         | —           | 0,0620          |
| <sup>43</sup> Tc | —                                               | 0,0679     | 0,0675     | 0,0602    | 0,0601    | —              | —           | 0,0589          |
| <sup>44</sup> Ru | —                                               | 0,0647     | 0,0643     | 0,0573    | 0,0572    | 0,0568         | —           | 0,0561          |
| <sup>45</sup> Rh | —                                               | 0,0618     | 0,0613     | 0,0546    | 0,0545    | 0,0541         | —           | 0,0534          |
| <sup>46</sup> Pd | —                                               | 0,0590     | 0,0585     | 0,0521    | 0,0520    | 0,0516         | —           | 0,0509          |
| <sup>47</sup> Ag | —                                               | 0,0564     | 0,0559     | 0,0498    | 0,0497    | 0,0493         | —           | 0,0486          |
| <sup>48</sup> Cd | —                                               | 0,0539     | 0,0535     | 0,0476    | 0,0475    | 0,0471         | —           | 0,0464          |
| <sup>49</sup> In | —                                               | 0,0516     | 0,0512     | 0,0455    | 0,0454    | 0,0451         | —           | 0,0444          |
| <sup>50</sup> Sn | —                                               | 0,0495     | 0,0491     | 0,0436    | 0,0435    | 0,0432         | —           | 0,0425          |
| <sup>51</sup> Sb | —                                               | 0,0475     | 0,0470     | 0,0418    | 0,0417    | 0,0414         | —           | 0,0407          |
| <sup>52</sup> Te | —                                               | 0,0456     | 0,0451     | 0,0401    | 0,0400    | —              | —           | 0,0390          |
| <sup>53</sup> I  | —                                               | 0,0438     | 0,0433     | 0,0385    | 0,0384    | —              | —           | 0,0374          |
| <sup>54</sup> Xe | —                                               | 0,0421     | 0,0416     | 0,0369    | 0,0368    | —              | —           | 0,0358          |
| <sup>55</sup> Cs | —                                               | 0,0405     | 0,0400     | 0,0355    | 0,0354    | —              | —           | 0,0345          |
| <sup>56</sup> Ba | —                                               | 0,0390     | 0,0385     | 0,0342    | 0,0341    | 0,0338         | —           | 0,0331          |
| <sup>57</sup> La | —                                               | 0,0375     | 0,0371     | 0,0329    | 0,0328    | 0,0325         | —           | 0,0318          |
| <sup>58</sup> Ce | —                                               | 0,0362     | 0,0357     | 0,0317    | 0,0316    | 0,0313         | —           | 0,0306          |
| <sup>59</sup> Pr | —                                               | 0,0349     | 0,0344     | 0,0305    | 0,0304    | —              | —           | 0,0295          |
| <sup>60</sup> Nd | —                                               | 0,0336     | 0,0332     | 0,0294    | 0,0293    | —              | —           | 0,0285          |
| <sup>61</sup> Pm | —                                               | 0,0325     | 0,0320     | 0,0284    | 0,0283    | —              | —           | 0,0274          |
| <sup>62</sup> Sm | —                                               | 0,0314     | 0,0309     | 0,0274    | 0,0273    | 0,0271         | —           | 0,0265          |



| Элемент          | Длина волны $\lambda$ , нм, при конечном уровне |            |            |           |           |                |             | Край поглощения |
|------------------|-------------------------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|----------------|-------------|-----------------|
|                  | $L_I$                                           | $L_{II}$   | $L_{III}$  | $M_{II}$  | $M_{III}$ | $M_{IV}$       | $M_V$       |                 |
|                  | —                                               | $\alpha_2$ | $\alpha_1$ | $\beta_3$ | $\beta_4$ | $\beta_5^{II}$ | $\beta_5^I$ |                 |
| <sup>63</sup> Eu | —                                               | 0,0303     | 0,0298     | 0,0264    | 0,0263    | —              | —           | 0,0256          |
| <sup>64</sup> Gd | —                                               | 0,0293     | 0,0288     | 0,0255    | 0,0254    | 0,0243         | —           | 0,0247          |
| <sup>65</sup> Tb | —                                               | 0,0283     | 0,0279     | 0,0247    | 0,0246    | —              | —           | 0,0238          |
| <sup>66</sup> Dy | —                                               | 0,0274     | 0,0269     | 0,0239    | 0,0238    | 0,0236         | —           | 0,0230          |
| <sup>67</sup> Ho | —                                               | 0,0265     | 0,0261     | 0,0231    | 0,0230    | 0,0228         | —           | 0,0223          |
| <sup>68</sup> Er | —                                               | 0,0257     | 0,0252     | 0,0223    | 0,0222    | 0,0221         | —           | 0,0216          |
| <sup>69</sup> Tm | —                                               | 0,0249     | 0,0244     | 0,0216    | 0,0215    | 0,0214         | —           | 0,0209          |
| <sup>70</sup> Yb | —                                               | 0,0241     | 0,0237     | 0,0209    | 0,0208    | 0,0207         | —           | 0,0202          |
| <sup>71</sup> Lu | —                                               | 0,0234     | 0,0229     | 0,0203    | 0,0202    | 0,0200         | —           | 0,0196          |
| <sup>72</sup> Hf | —                                               | 0,0227     | 0,0222     | 0,0197    | 0,0196    | —              | —           | 0,0190          |
| <sup>73</sup> Ta | —                                               | 0,0220     | 0,0215     | 0,0191    | 0,0190    | 0,0188         | —           | 0,0184          |
| <sup>74</sup> W  | 0,0216                                          | 0,0214     | 0,0209     | 0,0185    | 0,0184    | 0,0183         | —           | 0,0178          |
| <sup>75</sup> Re | —                                               | 0,0208     | 0,0203     | 0,0179    | 0,0178    | 0,0177         | —           | 0,0173          |
| <sup>76</sup> Os | —                                               | 0,0202     | 0,0197     | 0,0174    | 0,0173    | 0,0172         | —           | 0,0168          |
| <sup>77</sup> Ir | —                                               | 0,0196     | 0,0191     | 0,0169    | 0,0168    | 0,0167         | —           | 0,0163          |
| <sup>78</sup> Pt | —                                               | 0,0190     | 0,0186     | 0,0164    | 0,0163    | 0,0162         | —           | 0,0158          |
| <sup>79</sup> Au | —                                               | 0,0185     | 0,0180     | 0,0159    | 0,0158    | 0,0158         | —           | 0,0154          |
| <sup>80</sup> Hg | —                                               | 0,0180     | 0,0175     | 0,0155    | 0,0154    | 0,0153         | —           | 0,0149          |
| <sup>81</sup> Tl | —                                               | 0,0175     | 0,0170     | 0,0151    | 0,0150    | 0,0149         | —           | 0,0145          |
| <sup>82</sup> Pb | —                                               | 0,0170     | 0,0165     | 0,0146    | 0,0145    | 0,0145         | —           | 0,0141          |
| <sup>83</sup> Bi | —                                               | 0,0166     | 0,0161     | 0,0142    | 0,0141    | 0,0141         | —           | 0,0137          |
| <sup>84</sup> Po | —                                               | 0,0161     | 0,0156     | 0,0139    | 0,0138    | —              | —           | —               |
| <sup>85</sup> At | —                                               | 0,0157     | 0,0152     | 0,0135    | 0,0134    | —              | —           | —               |
| <sup>86</sup> Kп | —                                               | 0,0153     | 0,0148     | 0,0131    | 0,0130    | —              | —           | —               |
| <sup>87</sup> Er | —                                               | 0,0149     | 0,0144     | 0,0128    | 0,0127    | —              | —           | —               |
| <sup>88</sup> Ra | —                                               | 0,0145     | 0,0140     | 0,0124    | 0,0123    | —              | —           | —               |
| <sup>89</sup> Ac | —                                               | 0,0141     | 0,0136     | 0,0121    | 0,0120    | —              | —           | —               |
| <sup>90</sup> Th | —                                               | 0,0138     | 0,0133     | 0,0118    | 0,0117    | 0,0116         | —           | 0,0113          |
| <sup>91</sup> Pa | —                                               | 0,0134     | 0,0129     | 0,0115    | 0,0114    | —              | —           | —               |
| <sup>92</sup> U  | —                                               | 0,0131     | 0,0126     | 0,0112    | 0,0111    | 0,0110         | —           | 0,0107          |

Таблица 35.3. Длина волны  $\lambda$ , нм, L-серии диаграммных линий [3]

| Элемент          | Начальный уровень $L_I$ |           |           | $L_I$ -край<br>поглощения | Начальный уровень $L_{II}$ |           | $L_{II}$ - край<br>поглощения | Начальный уровень $L_{III}$ |                | $L_{III}$ -край<br>поглощения |
|------------------|-------------------------|-----------|-----------|---------------------------|----------------------------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------------------|
|                  | Конечный уровень        |           |           |                           | Конечный уровень           |           |                               | Конечный уровень            |                |                               |
|                  | $L_{II, III}$           | $M_{II}$  | $M_{III}$ |                           | $M_I$                      | $M_{IV}$  |                               | $M_I$                       | $M_{IV, V}$    |                               |
|                  | —                       | $\beta_4$ | $\beta_3$ |                           | $\gamma$                   | $\beta_1$ |                               | $I$                         | $\alpha_{1,2}$ |                               |
| $^{11}\text{Na}$ | 37,6                    | —         | —         | —                         | 40,71                      | —         | 40,50                         | 40,71                       | —              | 40,50                         |
| $^{12}\text{Mg}$ | 31,7                    | —         | —         | 19,37                     | 25,15                      | —         | 24,93                         | 25,15                       | —              | 25,07                         |
| $^{13}\text{Al}$ | 29,0                    | —         | —         | 14,25                     | 17,14                      | —         | 17,04                         | 17,14                       | —              | 17,04                         |
| $^{14}\text{Si}$ | —                       | —         | —         | —                         | 13,53                      | —         | 12,30                         | 13,55                       | —              | 12,30                         |
| $^{15}\text{P}$  | —                       | —         | —         | —                         | 10,38                      | —         | 9,40                          | 10,38                       | —              | 9,40                          |
| $^{16}\text{S}$  | —                       | —         | —         | —                         | 8,340                      | —         | —                             | 8,340                       | —              | —                             |
| $^{17}\text{Cl}$ | —                       | —         | —         | —                         | 6,733                      | —         | —                             | 6,790                       | —              | —                             |
| $^{18}\text{Ar}$ | —                       | —         | —         | —                         | 5,590                      | —         | —                             | 5,630                       | —              | —                             |
| $^{19}\text{K}$  | —                       | —         | —         | —                         | 4,724                      | —         | 4,210                         | 4,774                       | —              | 4,210                         |
| $^{20}\text{Ca}$ | —                       | —         | —         | —                         | 4,046                      | 3,594     | 3,513                         | 4,096                       | 3,633          | 3,549                         |
| $^{21}\text{Sc}$ | —                       | —         | —         | —                         | 3,513                      | 3,102     | —                             | 3,559                       | 3,135          | —                             |
| $^{22}\text{Ti}$ | —                       | —         | —         | —                         | 3,089                      | 2,705     | 2,729                         | 3,136                       | 2,742          | 2,729                         |
| $^{23}\text{V}$  | —                       | 2,189     | —         | —                         | 2,734                      | 2,388     | —                             | 2,777                       | 2,425          | —                             |
| $^{24}\text{Cr}$ | —                       | 1,943     | —         | 1,67                      | 2,430                      | 2,127     | 1,790                         | 2,478                       | 2,164          | 2,070                         |
| $^{25}\text{Mg}$ | —                       | 1,758     | —         | —                         | 2,185                      | 1,911     | —                             | 2,229                       | 1,945          | —                             |
| $^{26}\text{Fe}$ | —                       | 1,570     | —         | —                         | 1,975                      | 1,726     | 1,720                         | 2,015                       | 1,759          | 1,753                         |
| $^{27}\text{Co}$ | —                       | 1,427     | —         | —                         | 1,787                      | 1,567     | 1,562                         | 1,829                       | 1,597          | 1,592                         |
| $^{28}\text{Ni}$ | —                       | 1,316     | —         | —                         | 1,627                      | 1,427     | 1,424                         | 1,669                       | 1,456          | 1,453                         |

| Элемент          | Начальный уровень $L_I$ |           |           | $L_I$ - край<br>поглощения | Начальный уровень $L_{II}$ |           | $L_{II}$ -край<br>поглощения | Начальный уровень $L_{III}$ |                | $L_{III}$ - край<br>поглощения |
|------------------|-------------------------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------|------------------------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------|
|                  | Конечный уровень        |           |           |                            | Конечный уровень           |           |                              | Конечный уровень            |                |                                |
|                  | $L_{II, III}$           | $M_{II}$  | $M_{III}$ |                            | $M_I$                      | $M_{IV}$  |                              | $M_I$                       | $M_{IV, V}$    |                                |
|                  | —                       | $\beta_4$ | $\beta_3$ |                            | $\eta$                     | $\beta_1$ |                              | $l$                         | $\alpha_{1,2}$ |                                |
| <sup>29</sup> Cu | —                       | 1,210     | —         | —                          | 1,490                      | 1,305     | 1,301                        | 1,525                       | 1,334          | 1,329                          |
| <sup>30</sup> Zn | —                       | 1,119     | 1,306     | 1,306                      | 1,368                      | 1,198     | 1,186                        | 1,402                       | 1,225          | 1,213                          |
| <sup>31</sup> Ga | —                       | 1,037     | 0,952     | 0,952                      | 1,260                      | 1,102     | 1,083                        | 1,295                       | 1,129          | 1,110                          |
| <sup>32</sup> Ge | —                       | 0,964     | 0,958     | 0,877                      | 1,161                      | 1,018     | 0,992                        | 1,194                       | 1,044          | 1,019                          |
| <sup>33</sup> As | —                       | 0,893     | 0,811     | 0,811                      | 1,073                      | 0,941     | 0,913                        | 1,107                       | 0,967          | 0,937                          |
| <sup>34</sup> Se | —                       | 0,832     | 0,750     | 0,750                      | 0,996                      | 0,874     | 0,841                        | 1,029                       | 0,899          | 0,865                          |
| <sup>35</sup> Br | —                       | 0,777     | 0,696     | 0,696                      | 0,926                      | 0,813     | 0,775                        | 0,959                       | 0,837          | 0,798                          |
| <sup>36</sup> Kr | —                       | 0,730     | 0,726     | 0,647                      | —                          | 0,758     | 0,717                        | —                           | 0,782          | 0,739                          |
| <sup>37</sup> Rb | —                       | 0,682     | 0,679     | 0,601                      | 0,804                      | 0,708     | 0,664                        | 0,836                       | 0,732          | 0,686                          |
| <sup>38</sup> Sr | —                       | 0,640     | 0,637     | 0,559                      | 0,752                      | 0,662     | 0,617                        | 0,784                       | 0,687          | 0,639                          |
| <sup>39</sup> Y  | —                       | 0,602     | 0,598     | 0,522                      | 0,704                      | 0,621     | 0,576                        | 0,736                       | 0,645          | 0,596                          |
| <sup>40</sup> Zr | —                       | 0,567     | 0,563     | 0,488                      | 0,661                      | 0,584     | 0,538                        | 0,692                       | 0,607          | 0,558                          |
| <sup>41</sup> Nb | —                       | 0,535     | 0,531     | 0,458                      | 0,621                      | 0,549     | 0,503                        | 0,652                       | 0,573          | 0,523                          |
| <sup>42</sup> Mo | —                       | 0,505     | 0,501     | 0,430                      | 0,585                      | 0,518     | 0,472                        | 0,615                       | 0,541          | 0,491                          |
| <sup>43</sup> Tc | —                       | —         | —         | 0,406                      | —                          | 0,489     | 0,444                        | —                           | 0,511          | 0,463                          |
| <sup>44</sup> Ru | —                       | 0,452     | 0,449     | 0,384                      | 0,521                      | 0,462     | 0,418                        | 0,550                       | 0,485          | 0,437                          |
| <sup>45</sup> Rh | —                       | 0,429     | 0,425     | 0,363                      | 0,492                      | 0,437     | 0,394                        | 0,522                       | 0,460          | 0,413                          |
| <sup>46</sup> Pd | —                       | 0,407     | 0,403     | 0,344                      | 0,466                      | 0,415     | 0,372                        | 0,495                       | 0,437          | 0,391                          |
| <sup>47</sup> Ag | —                       | 0,387     | 0,383     | 0,326                      | 0,442                      | 0,393     | 0,353                        | 0,471                       | 0,415          | 0,370                          |
| <sup>48</sup> Cd | —                       | 0,368     | 0,364     | 0,308                      | 0,419                      | 0,374     | 0,333                        | 0,448                       | 0,396          | 0,350                          |
| <sup>49</sup> In | —                       | 0,351     | 0,347     | 0,293                      | 0,398                      | 0,356     | 0,315                        | 0,427                       | 0,377          | 0,332                          |
| <sup>50</sup> Sn | —                       | 0,334     | 0,341     | 0,278                      | 0,379                      | 0,339     | 0,298                        | 0,407                       | 0,360          | 0,316                          |
| <sup>51</sup> Sb | —                       | 0,319     | 0,315     | 0,264                      | 0,361                      | 0,323     | 0,283                        | 0,389                       | 0,344          | 0,300                          |
| <sup>52</sup> Te | —                       | 0,305     | 0,301     | 0,251                      | 0,344                      | 0,308     | 0,269                        | 0,372                       | 0,329          | 0,286                          |
| <sup>53</sup> I  | —                       | 0,291     | 0,287     | 0,239                      | 0,328                      | 0,294     | 0,255                        | 0,356                       | 0,315          | 0,272                          |
| <sup>54</sup> Xe | —                       | —         | —         | 0,227                      | —                          | —         | 0,243                        | —                           | 0,302          | 0,259                          |
| <sup>55</sup> Cs | —                       | 0,266     | 0,263     | 0,217                      | 0,299                      | 0,268     | 0,231                        | 0,327                       | 0,289          | 0,247                          |
| <sup>56</sup> Ba | —                       | 0,256     | 0,252     | 0,207                      | 0,286                      | 0,257     | 0,220                        | 0,314                       | 0,278          | 0,236                          |
| <sup>57</sup> La | —                       | 0,245     | 0,241     | 0,198                      | 0,274                      | 0,246     | 0,211                        | 0,301                       | 0,267          | 0,226                          |
| <sup>58</sup> Ce | —                       | 0,235     | 0,231     | 0,189                      | 0,262                      | 0,236     | 0,201                        | 0,289                       | 0,256          | 0,217                          |
| <sup>59</sup> Pr | —                       | 0,226     | 0,222     | 0,181                      | 0,251                      | 0,226     | 0,193                        | 0,278                       | 0,246          | 0,208                          |
| <sup>60</sup> Nd | —                       | 0,217     | 0,213     | 0,174                      | 0,241                      | 0,217     | 0,184                        | 0,268                       | 0,237          | 0,200                          |
| <sup>61</sup> Pm | —                       | —         | 0,204     | 0,167                      | —                          | 0,208     | 0,177                        | —                           | 0,228          | 0,192                          |
| <sup>62</sup> Sm | —                       | 0,200     | 0,196     | 0,160                      | 0,222                      | 0,200     | 0,169                        | 0,248                       | 0,220          | 0,185                          |
| <sup>63</sup> Eu | —                       | 0,193     | 0,189     | 0,154                      | 0,213                      | 0,192     | 0,163                        | 0,239                       | 0,212          | 0,178                          |
| <sup>64</sup> Gd | —                       | 0,185     | 0,182     | 0,148                      | 0,205                      | 0,185     | 0,156                        | 0,231                       | 0,205          | 0,171                          |
| <sup>65</sup> Tb | —                       | 0,179     | 0,175     | 0,142                      | 0,197                      | 0,178     | 0,150                        | 0,224                       | 0,198          | 0,165                          |
| <sup>66</sup> Dy | —                       | 0,172     | 0,168     | 0,137                      | 0,190                      | 0,171     | 0,144                        | 0,216                       | 0,191          | 0,159                          |
| <sup>67</sup> Ho | —                       | 0,166     | 0,162     | 0,132                      | 0,183                      | 0,165     | 0,139                        | 0,209                       | 0,185          | 0,154                          |
| <sup>68</sup> Er | —                       | 0,160     | 0,156     | 0,127                      | 0,176                      | 0,159     | 0,134                        | 0,202                       | 0,179          | 0,148                          |
| <sup>69</sup> Tm | —                       | 0,154     | 0,151     | 0,123                      | 0,170                      | 0,153     | 0,129                        | 0,196                       | 0,173          | 0,143                          |
| <sup>70</sup> Yb | —                       | 0,149     | 0,145     | 0,118                      | 0,164                      | 0,148     | 0,124                        | 0,189                       | 0,168          | 0,139                          |
| <sup>71</sup> Lu | —                       | 0,144     | 0,140     | 0,114                      | 0,158                      | 0,142     | 0,120                        | 0,184                       | 0,163          | 0,134                          |
| <sup>72</sup> Hf | —                       | 0,139     | 0,135     | 0,110                      | 0,152                      | 0,137     | 0,115                        | 0,178                       | 0,158          | 0,130                          |
| <sup>73</sup> Ta | —                       | 0,135     | 0,131     | 0,106                      | 0,147                      | 0,132     | 0,111                        | 0,173                       | 0,153          | 0,126                          |
| <sup>74</sup> W  | —                       | 0,130     | 0,126     | 0,102                      | 0,142                      | 0,128     | 0,107                        | 0,169                       | 0,148          | 0,122                          |
| <sup>75</sup> Re | —                       | 0,126     | 0,122     | 0,099                      | 0,137                      | 0,124     | 0,104                        | 0,163                       | 0,144          | 0,118                          |
| <sup>76</sup> Os | —                       | 0,122     | 0,118     | 0,096                      | 0,133                      | 0,119     | 0,100                        | 0,158                       | 0,140          | 0,114                          |
| <sup>77</sup> Ir | —                       | 0,118     | 0,114     | 0,092                      | 0,128                      | 0,116     | 0,097                        | 0,154                       | 0,136          | 0,111                          |
| <sup>78</sup> Pt | —                       | 0,114     | 0,110     | 0,089                      | 0,124                      | 0,112     | 0,093                        | 0,150                       | 0,132          | 0,107                          |
| <sup>79</sup> Au | —                       | 0,111     | 0,107     | 0,086                      | 0,120                      | 0,108     | 0,090                        | 0,146                       | 0,128          | 0,104                          |
| <sup>80</sup> Hg | —                       | 0,107     | 0,103     | 0,084                      | 0,116                      | 0,105     | 0,087                        | 0,142                       | 0,125          | 0,101                          |
| <sup>81</sup> Tl | —                       | 0,104     | 0,100     | 0,081                      | 0,113                      | 0,101     | 0,084                        | 0,138                       | 0,121          | 0,098                          |
| <sup>82</sup> Pb | —                       | 0,101     | 0,097     | 0,078                      | 0,109                      | 0,098     | 0,082                        | 0,135                       | 0,118          | 0,095                          |
| <sup>83</sup> Bi | —                       | 0,098     | 0,094     | 0,076                      | 0,106                      | 0,095     | 0,079                        | 0,132                       | 0,115          | 0,092                          |
| <sup>84</sup> Po | —                       | 0,097     | 0,091     | —                          | —                          | 0,092     | —                            | 0,128                       | 0,112          | —                              |
| <sup>85</sup> At | —                       | —         | 0,088     | —                          | —                          | 0,089     | —                            | —                           | 0,109          | —                              |
| <sup>86</sup> Rn | —                       | —         | 0,085     | —                          | —                          | 0,087     | —                            | —                           | 0,106          | —                              |
| <sup>87</sup> Er | —                       | —         | 0,083     | —                          | —                          | 0,084     | —                            | —                           | 0,104          | —                              |

| Элемент          | Начальный уровень $L_I$ |           |           | $L_I$ - край<br>поглощения | Начальный уровень $L_{II}$ |           | $L_{II}$ - край<br>поглощения | Начальный уровень $L_{III}$ |                 | $L_{III}$ - край<br>поглощения |
|------------------|-------------------------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
|                  | Конечный уровень        |           |           |                            | Конечный уровень           |           |                               | Конечный уровень            |                 |                                |
|                  | $L_{II, III}$           | $M_{II}$  | $M_{III}$ |                            | $M_I$                      | $M_{IV}$  |                               | $M_I$                       | $M_{IV, V}$     |                                |
|                  | —                       | $\beta_4$ | $\beta_3$ |                            | $\gamma$                   | $\beta_1$ |                               | $l$                         | $\lambda_{1,2}$ |                                |
| <sup>88</sup> Ra | —                       | 0,084     | 0,080     | 0,065                      | 0,091                      | 0,081     | 0,067                         | 0,117                       | 0,101           | 0,080                          |
| <sup>89</sup> Ac | —                       | —         | 0,078     | —                          | —                          | 0,079     | —                             | —                           | 0,099           | —                              |
| <sup>90</sup> Th | —                       | 0,079     | 0,075     | 0,061                      | 0,085                      | 0,077     | 0,063                         | 0,112                       | 0,096           | 0,076                          |
| <sup>91</sup> Pa | —                       | 0,077     | 0,073     | —                          | 0,083                      | 0,074     | —                             | 0,109                       | 0,094           | —                              |
| <sup>92</sup> U  | —                       | 0,075     | 0,071     | 0,057                      | 0,081                      | 0,072     | 0,059                         | 0,107                       | 0,092           | 0,072                          |
| <sup>93</sup> Np | —                       | 0,073     | 0,069     | —                          | 0,078                      | 0,070     | —                             | 0,104                       | 0,090           | —                              |
| <sup>94</sup> Pu | —                       | 0,071     | 0,067     | 0,054                      | 0,076                      | 0,068     | 0,056                         | 0,102                       | 0,088           | 0,069                          |
| <sup>95</sup> Am | —                       | 0,069     | 0,065     | —                          | —                          | 0,066     | —                             | 0,100                       | 0,086           | —                              |

### 35.4. ШИРИНА ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Продолжение табл. 35.4

В соответствии с принципом неопределенности энергетические уровни (термы) имеют конечную ширину. Это приводит к наличию некоторого «разбега» по энергиям у квантов одной и той же спектральной линии. Для самой линии характерна конечная ширина, соизмеримая с междублетным расстоянием. Значения ширины ярких линий на половине высоты приведены в табл. 35.4. Это величины непосредственно определяются шириной валентной зоны.

Таблица 35.4. Значения ширины ярких линий рентгеновского излучения на половине высоты  $\Delta\lambda$ , нм [3]

| Элемент          | K-линия начального уровня |            |           |           | L-линия начального уровня |         | M-линия начального уровня |
|------------------|---------------------------|------------|-----------|-----------|---------------------------|---------|---------------------------|
|                  | $\alpha_1$                | $\alpha_2$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\alpha$                  | $\beta$ |                           |
| <sup>22</sup> Ti | 1,38                      | 1,90       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>23</sup> V  | 1,58                      | 2,21       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>24</sup> Cr | 1,96                      | 2,43       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>25</sup> Mn | 2,46                      | 2,96       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>26</sup> Fe | 2,65                      | 3,00       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>27</sup> Co | 2,45                      | 3,12       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>28</sup> Ni | 2,26                      | 3,03       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>29</sup> Cu | 2,31                      | 3,21       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>30</sup> Zn | 2,44                      | 2,90       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>31</sup> Ga | 2,40                      | 2,55       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>32</sup> Ge | 2,73                      | 2,94       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>38</sup> Sr | 4,5                       | 4,6        | —         | —         | —                         | —       | 1,52                      |
| <sup>39</sup> Y  | —                         | —          | —         | —         | —                         | —       | 0,44                      |
| <sup>40</sup> Zr | 5,2                       | 5,4        | —         | —         | 1,94                      | 1,97    | 0,827                     |
| <sup>41</sup> Nb | 5,8                       | 5,4        | —         | —         | 1,94                      | 2,12    | 1,24                      |
| <sup>42</sup> Mo | 5,86                      | 6,18       | —         | —         | 1,95                      | 2,21    | 1,63                      |
| <sup>44</sup> Ru | 6,8                       | 6,7        | —         | —         | 2,55                      | 2,83    | 2,49                      |
| <sup>45</sup> Rh | 7,3                       | 7,2        | —         | —         | 2,54                      | 2,87    | 3,77                      |
| <sup>46</sup> Rd | 7,8                       | 7,9        | —         | —         | 2,94                      | 2,97    | 7,26                      |
| <sup>47</sup> Ag | 8,6                       | 8,7        | —         | —         | 3,16                      | 2,74    | 10,24                     |
| <sup>48</sup> Cd | —                         | —          | —         | —         | 2,81                      | 3,50    | —                         |
| <sup>50</sup> Sn | —                         | —          | 11,7      | 11,5      | —                         | —       | —                         |
| <sup>51</sup> Sb | 10,6                      | 14,2       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>52</sup> Te | 11,0                      | 14,0       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>53</sup> I  | 10,7                      | 15,1       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>55</sup> Cs | 15,0                      | 15,1       | 17,7      | 14,6      | —                         | —       | —                         |
| <sup>56</sup> Ba | 15,2                      | 18,0       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>57</sup> La | —                         | 17,2       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>58</sup> Ce | 12,8                      | 17,0       | 18,8      | 17,3      | —                         | —       | —                         |
| <sup>60</sup> Nd | 14,4                      | 21,2       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>62</sup> Sm | 23,9                      | 24,2       | 27,5      | 24,7      | —                         | —       | —                         |
| <sup>63</sup> Eu | —                         | 22,2       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>64</sup> Gd | 27,0                      | 26,4       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>65</sup> Tb | —                         | 24,6       | 33,2      | 33,0      | —                         | —       | —                         |
| <sup>66</sup> Dy | 27,9                      | 26,1       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>67</sup> Ho | 30,2                      | 28,8       | 33,5      | 34,0      | —                         | —       | —                         |
| <sup>68</sup> Er | —                         | 29,5       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>69</sup> Tm | —                         | 36,9       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>70</sup> Yb | 40,4                      | 32,5       | 44,0      | 37,8      | —                         | —       | —                         |
| <sup>71</sup> Lu | 39,3                      | 39,8       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>72</sup> Hf | —                         | 38,7       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>73</sup> Ta | 42,4                      | 36,4       | 44,9      | 49,3      | —                         | —       | —                         |
| <sup>74</sup> W  | 43,2                      | 37,4       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>75</sup> Re | 46,4                      | 52,9       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>76</sup> Os | 55,0                      | 50,9       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>77</sup> Ir | 53,0                      | 50,3       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>78</sup> Pt | 58,0                      | 63,3       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>79</sup> Au | 55,5                      | 56,7       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>80</sup> Hg | 64,0                      | 68,5       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>81</sup> Tl | —                         | 78,2       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>82</sup> Pb | 65,5                      | 68,7       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>83</sup> Bi | —                         | 83,5       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>90</sup> Th | 95,0                      | 92,6       | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>92</sup> U  | 105,0                     | 107,5      | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>93</sup> Np | 98,5                      | 103,9      | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>94</sup> Pu | —                         | 114,0      | —         | —         | —                         | —       | —                         |
| <sup>95</sup> Am | 115,0                     | 129,5      | —         | —         | —                         | —       | —                         |

Таблица 35.5. Относительная интенсивность линий K- и L-серий (в процентах интенсивности соответственно  $K_{\alpha 1}$ -линий, для Ag—Ca—от дублета  $K_{\alpha 1} + K_{\alpha 2}$  и L-линий, для K—Co—от дублета  $L_{\alpha 1} + L_{\alpha 2}$ )

| Элемент          | K-Серия    |           |           |           |           | L-Серия    |           |      |           |                |
|------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------|-----------|----------------|
|                  | $\alpha_2$ | $\beta_3$ | $\beta_1$ | $\beta_5$ | $\beta_2$ | $\alpha_1$ | $\beta_2$ | $I$  | $\beta_6$ | $\beta_{2,15}$ |
| <sup>18</sup> Ar | —          | —         | 10,3      | —         | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>19</sup> K  | —          | —         | 12,2      | —         | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>20</sup> Ca | —          | —         | 12,8      | —         | —         | 100        | —         | 250  | —         | —              |
| <sup>21</sup> Sc | 50,7       | —         | 20,0      | —         | —         | 100        | —         | 250  | —         | —              |
| <sup>22</sup> Ti | 50,2       | —         | 19,8      | 0,44      | —         | 100        | —         | 165  | —         | —              |
| <sup>23</sup> V  | 50,7       | —         | 20,5      | 0,45      | —         | 100        | —         | 250  | —         | —              |
| <sup>24</sup> Cr | 50,5       | —         | 17,9      | 0,43      | —         | 100        | —         | 77   | —         | —              |
| <sup>25</sup> Mn | 50,0       | —         | 22,4      | 0,34      | —         | 100        | —         | 100  | —         | —              |
| <sup>26</sup> Fe | 50,6       | —         | 16,7      | 0,21      | —         | 100        | —         | 80   | —         | —              |
| <sup>27</sup> Co | 50,2       | —         | 16,0      | 0,14      | —         | 100        | —         | 75   | —         | —              |
| <sup>28</sup> Ni | 50,7       | —         | 18,7      | 0,20      | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>29</sup> Cu | 50,7       | —         | 20,0      | 0,15      | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>30</sup> Zn | 51,3       | —         | 20,7      | —         | 0,36      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>31</sup> Ga | 50,7       | —         | 21,6      | —         | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>32</sup> Ge | 51,2       | —         | 24,0      | —         | 1,32      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>33</sup> As | 43,2       | —         | 21,7      | —         | 0,69      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>34</sup> Se | 52,3       | —         | 21,0      | —         | 1,07      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>35</sup> Br | 50,9       | —         | 22,2      | —         | 1,73      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>36</sup> Kr | —          | —         | 17,2      | —         | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>37</sup> Rb | 51,0       | —         | 23,9      | —         | 2,5       | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>38</sup> Sr | 52,1       | —         | 27,4      | —         | 4,16      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>39</sup> Y  | 52,3       | —         | 23,3      | —         | 3,19      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>40</sup> Zr | 52,4       | —         | 24,9      | —         | 3,70      | 100        | 12,0      | 3,5  | 0,6       | 2,0            |
| <sup>41</sup> Nb | 52,6       | —         | 27,9      | —         | 4,90      | 100        | 14,0      | 4,0  | 0,7       | 4,7            |
| <sup>42</sup> Mo | 52,5       | —         | 26,5      | —         | 4,30      | 100        | 11,0      | 2,4  | —         | 5,6            |
| <sup>44</sup> Ru | 51,1       | —         | 29,3      | —         | 5,63      | 100        | —         | —    | —         | 10,7           |
| <sup>45</sup> Rh | 52,5       | —         | 27,6      | —         | 4,60      | 100        | —         | —    | —         | 15,2           |
| <sup>46</sup> Pd | 52,6       | —         | 29,0      | —         | 6,13      | 100        | —         | —    | —         | 16,8           |
| <sup>47</sup> Ag | 52,2       | —         | 28,4      | —         | 4,9       | 100        | —         | —    | —         | 25,8           |
| <sup>48</sup> Cd | 54,4       | —         | 29,7      | —         | 6,42      | 100        | —         | —    | —         | 36,0           |
| <sup>49</sup> In | 53,9       | —         | 29,6      | —         | 6,47      | 100        | —         | —    | —         | 25,2           |
| <sup>50</sup> Sn | 54,1       | —         | 29,8      | —         | 5,5       | 100        | —         | —    | —         | 27,9           |
| <sup>51</sup> Sb | 51,7       | —         | 31,0      | —         | 7,08      | 100        | —         | —    | —         | 26,5           |
| <sup>52</sup> Te | 52,7       | —         | 30,6      | —         | 7,35      | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>53</sup> I  | 53,6       | —         | 30,1      | —         | 6,0       | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>55</sup> Cs | 54,0       | —         | —         | —         | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>56</sup> Ba | 56,2       | —         | 30,4      | —         | 7,1       | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>57</sup> La | 56,4       | —         | —         | —         | —         | 100        | 11,4      | —    | —         | 21,2           |
| <sup>58</sup> Ce | 50,8       | —         | 30,3      | —         | 8,0       | 100        | 9,8       | 4,7  | —         | 22,4           |
| <sup>59</sup> Pr | 53,0       | —         | —         | —         | —         | —          | 11,0      | —    | —         | 20,4           |
| <sup>60</sup> Nd | 53,2       | —         | —         | —         | —         | 100        | 10,4      | —    | —         | 22,5           |
| <sup>62</sup> Sm | 54,0       | —         | 32,1      | —         | 7,5       | 100        | 8,5       | 4,8  | 0,66      | 21,7           |
| <sup>63</sup> Eu | 54,9       | —         | —         | —         | —         | —          | —         | —    | —         | —              |
| <sup>64</sup> Gd | 56,9       | —         | 31,0      | —         | 8,7       | 100        | 12,5      | 5,2  | —         | 19,8           |
| <sup>65</sup> Tb | 56,2       | —         | —         | —         | —         | 100        | 11,5      | 2,64 | —         | 19,8           |
| <sup>66</sup> Dy | 55,1       | —         | —         | —         | —         | 100        | 10,3      | —    | —         | 19,6           |
| <sup>67</sup> Ho | 56,0       | —         | 32,0      | —         | 8,8       | 100        | 11,6      | 5,5  | 0,57      | 17,7           |
| <sup>68</sup> Er | 52,2       | —         | —         | —         | —         | 100        | 11,5      | —    | —         | 19,6           |
| <sup>69</sup> Tm | 57,6       | —         | —         | —         | —         | 100        | 11,3      | 3,11 | 1,08      | 15,0           |
| <sup>70</sup> Yb | 58,7       | —         | 32,7      | —         | 8,9       | 100        | 11,9      | —    | —         | 22,0           |
| <sup>71</sup> Lu | 58,5       | —         | —         | —         | —         | 100        | 11,7      | 3,48 | —         | 17,9           |
| <sup>72</sup> Hf | 57,1       | —         | —         | —         | —         | 100        | 11,6      | 3,06 | —         | 19,2           |
| <sup>73</sup> Ta | 55,4       | 12,5      | 24,3      | 0,57      | 7,8       | 100        | 12,0      | 5,7  | 1,2       | 20,2           |
| <sup>74</sup> W  | 57,8       | 13,3      | 24,8      | 0,56      | 8,5       | 100        | 11,7      | 3,38 | 1,2       | 22,2           |
| <sup>75</sup> Re | 58,7       | 12,8      | 24,6      | 0,57      | 8,5       | 100        | 11,7      | —    | 1,8       | 21,4           |
| <sup>76</sup> Os | 60,2       | 12,9      | 25,0      | 0,69      | 8,9       | 100        | 11,1      | —    | —         | 26,9           |
| <sup>77</sup> Ir | 57,7       | 12,7      | 24,3      | 0,64      | 7,8       | 100        | 11,5      | 6,0  | 1,4       | 23,8           |
| <sup>78</sup> Pt | 56,3       | 12,9      | 24,6      | 0,69      | 9,0       | 100        | 11,8      | —    | 1,5       | 23,2           |
| <sup>79</sup> Au | 58,5       | 13,2      | 25,8      | 0,77      | 8,8       | 100        | 11,5      | 6,0  | 1,3       | 25,9           |
| <sup>80</sup> Hg | 59,5       | 13,1      | 26,6      | 0,72      | 10,0      | 100        | 11,0      | —    | 1,3       | 22,9           |
| <sup>81</sup> Tl | 57,4       | 13,9      | 25,7      | 0,65      | 10,1      | 100        | 10,5      | —    | 1,7       | 26,8           |
| <sup>82</sup> Pb | 59,6       | 14,0      | 26,2      | 0,74      | 10,0      | 100        | 11,9      | 4,1  | 1,7       | 24,0           |

| Элемент          | K-Серия    |           |           |           |           | L-Серия    |            |     |           |                |
|------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----|-----------|----------------|
|                  | $\alpha_2$ | $\beta_3$ | $\beta_1$ | $\beta_5$ | $\beta_2$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $i$ | $\beta_6$ | $\beta_{2,15}$ |
| <sup>83</sup> Bi | 59,9       | 13,4      | 26,8      | 0,80      | 10,0      | 100        | 11,3       | 6,3 | 1,8       | 24,0           |
| <sup>90</sup> Tl | 61,0       | 14,0      | 28,4      | 0,98      | 11,8      | 100        | 10,7       | 7,2 | 1,9       | 28,4           |
| <sup>91</sup> Pa | —          | —         | —         | —         | —         | 100        | 10,9       | —   | —         | 24,0           |
| <sup>92</sup> U  | 61,0       | 14,0      | 27,8      | 0,98      | 12,0      | 100        | 10,6       | 4,5 | 1,7       | 26,8           |
| <sup>93</sup> Np | 63,5       | —         | —         | —         | —         | —          | —          | —   | —         | —              |
| <sup>94</sup> Pu | 63,0       | —         | —         | —         | —         | 100        | 10,2       | —   | 1,7       | 24,9           |
| <sup>95</sup> Am | 61,9       | —         | —         | —         | —         | —          | —          | —   | —         | —              |
| <sup>96</sup> Cm | 63,2       | 11,2      | 23,0      | —         | —         | —          | —          | —   | —         | —              |
| <sup>97</sup> Bk | 64,3       | 12,6      | 22,2      | —         | —         | —          | —          | —   | —         | —              |
| <sup>98</sup> Cf | 65,7       | 13,3      | 25,9      | —         | —         | —          | —          | —   | —         | —              |
| <sup>99</sup> Es | 66,6       | 13,4      | 24,2      | —         | —         | —          | —          | —   | —         | —              |

### 35.5. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ

Интенсивность линий рентгеновского излучения определяется силой осциллятора и частотой соответствующего перехода, а также статистическим весом уровня атома. Вычисление сил осцилляторов представляет собой трудоемкую задачу. По данным экспериментальных исследований для излучения K-серии интенсивность определяется уравнением  $I = \kappa i (U - U_{кр})^r$ , где  $U_{кр}$  — порог возбуждения серии;  $i$  — ток, проходящий через трубку;  $U$  — подаваемое напряжение; показатель  $r = 1,6 \div 2$ ;  $\kappa$  — эмпирический параметр. Относительная интенсивность линий спектра определяется вероятностью перехода между уровнями. Для наиболее часто используемой K-серии отношения  $I_{\alpha 1} : I_{\alpha 2} : I_{\beta} = 10 : 5 : 2$ , а отношение  $\lambda_{\alpha} : \lambda_{\beta} = 1,09$ . Значения относительной интенсивности линий K и L-серий приведены в табл. 35.5 [2, 3].

### 35.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом сопровождается вторичным излучением, возникающим в процессе прямого вырывания электронов из атома (фотоэффект) и последующего отрыва внешних электронов в ходе заполнения внутренних электронных оболочек. Перестройке электронных оболочек сопутствует излучение рентгеновских квантов с меньшей энергией (флуоресцентное излучение), или так называемого ожелектрона (вторичный фотоэффект). Прямое взаимодействие рентгеновского излучения с электронами внешних оболочек приводит к возникновению комптоновских

электронов. Ко вторичному излучению относится и рентгеновское излучение, неупруго рассеянное на тепловых колебаниях кристаллической решетки. В некоторых случаях при облучении кристалла рентгеновским излучением наблюдается люминесцентное излучение. Все эти процессы ответственны за поглощение рентгеновского излучения. В результате этих процессов и упругого рассеяния интенсивность первичного пучка  $I_0$  при прохождении слоя вещества толщиной  $t$  уменьшается по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \exp(-\mu t),$$

где  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления,  $\text{см}^{-1}$ . Если вещество состоит из атомов одного сорта, то полезно ввести так называемый массовый коэффициент ослабления  $\mu_m = \mu/\rho$ ,  $\text{см}^2/\text{г}$ , где  $\rho$  — плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Коэффициент ослабления пропорционален приблизительно  $\lambda^3$ , а также  $Z^3$ ; по мере уменьшения длины волны рентгеновского излучения падает и  $\mu$ . Однако при некоторых значениях волны ( $\lambda_{кр}$ ) коэффициент ослабления резко возрастает (край полосы поглощения), а затем вновь убывает с уменьшением длины волны по тому же закону.

Для сложного химического вещества линейный коэффициент ослабления можно выразить через массовые концентрации  $c_i$  и массовые коэффициенты  $\mu_{mi}$  элементов, образующих данное соединение:  $\mu = \rho \sum_i c_i \mu_{mi}$ , где суммирование производится по всем элементам, входящим в сложную молекулу.

Значения массового коэффициента ослабления для K-линий излучающих элементов, широко используемых в исследованиях, приведены в табл. 35.6 [3].

Таблица 35.6. Значения массового коэффициента ослабления  $\mu_m$ , см<sup>2</sup>/г, для  $K_{\alpha}$ -н  $K_{\beta}$ -линий различных излучателей [3]

| Погло-<br>щающий<br>элемент | Cr $K_{\alpha 1}$ | Cr $K_{\beta 1}$ | Fe $K_{\alpha 1}$ | Fe $K_{\beta 1}$ | Co $K_{\alpha 1}$   | Co $K_{\beta 1}$ | Ni $K_{\alpha 1}$  | Ni $K_{\beta 1}$ | Cu $K_{\alpha 1}$ | Cu $K_{\beta 1}$ | Mo $K_{\alpha 1}$ | Mo $K_{\beta 1}$ |
|-----------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| <sup>3</sup> Li             | 1,77              | 1,35             | 1,08              | 0,816            | 0,861               | 0,646            | 0,689              | 0,514            | 0,557             | 0,414            | 0,058             | 0,270            |
| <sup>4</sup> Be             | 4,28              | 3,25             | 2,62              | 1,97             | 2,08                | 1,56             | 1,67               | 1,24             | 1,35              | 1,0              | 0,240             | 0,223            |
| <sup>5</sup> B              | 8,49              | 6,46             | 5,20              | 3,92             | 4,13                | 3,10             | 3,31               | 2,49             | 2,67              | 1,99             | 0,360             | 0,290            |
| <sup>6</sup> C              | 14,9              | 11,3             | 9,10              | 6,86             | 7,23                | 5,42             | 5,79               | 4,32             | 4,67              | 3,47             | 0,555             | 0,445            |
| <sup>7</sup> N              | 28,9              | 18,1             | 14,6              | 11,0             | 11,6                | 8,70             | 9,29               | 6,93             | 7,50              | 5,58             | 0,820             | 0,626            |
| <sup>8</sup> O              | 35,9              | 27,3             | 22,0              | 16,6             | 17,5                | 13,10            | 14,0               | 10,4             | 11,3              | 8,40             | 1,17              | 0,884            |
| <sup>9</sup> Fe             | 51,6              | 39,2             | 31,6              | 29,8             | 25,1                | 18,80            | 20,1               | 15,0             | 16,2              | 12,0             | 1,68              | 1,20             |
| <sup>10</sup> Ne            | 71,3              | 54,2             | 43,7              | 32,9             | 34,7                | 26,0             | 27,8               | 20,7             | 22,4              | 16,7             | 2,33              | 1,60             |
| <sup>11</sup> Na            | 97,0              | 74,7             | 60,7              | 46,3             | 48,7                | 37,0             | 39,4               | 30,0             | 32,1              | 24,2             | 3,40              | 2,18             |
| <sup>12</sup> Mg            | 123               | 94,7             | 77,0              | 58,7             | 61,8                | 46,9             | 50,0               | 37,8             | 40,8              | 30,7             | 4,57              | 2,95             |
| <sup>13</sup> Al            | 153               | 118              | 95,8              | 73,1             | 76,8                | 58,4             | 62,1               | 47,0             | 50,7              | 38,2             | 5,21              | 3,68             |
| <sup>14</sup> Si            | 187               | 144              | 117               | 89,5             | 94,1                | 71,5             | 76,1               | 57,6             | 62,1              | 46,7             | 7,12              | 4,80             |
| <sup>15</sup> P             | 226               | 174              | 142               | 108              | 114                 | 86,3             | 91,8               | 69,5             | 74,9              | 56,4             | 8,30              | 5,73             |
| <sup>16</sup> S             | 270               | 208              | 196               | 129              | 135                 | 103              | 110                | 82,9             | 89,4              | 67,3             | 10,3              | 7,29             |
| <sup>17</sup> Cl            | 318               | 245              | 199               | 152              | 160                 | 121              | 129                | 97,8             | 105               | 79,4             | 12,1              | 8,60             |
| <sup>18</sup> Ar            | 372               | 286              | 233               | 178              | 187                 | 142              | 151                | 114              | 123               | 92,8             | 13,5              | 10,0             |
| <sup>19</sup> K             | 407               | 317              | 260               | 201              | 211                 | 162              | 172                | 132              | 142               | 108              | 17,3              | 11,9             |
| <sup>20</sup> Ca            | 462               | 360              | 296               | 228              | 240                 | 184              | 196                | 150              | 161               | 123              | 20,5              | 13,8             |
| <sup>21</sup> Sc            | 521               | 406              | 333               | 258              | 270                 | 208              | 221                | 169              | 182               | 139              | 23,1              | 16,0             |
| <sup>22</sup> Ti            | 585               | 456              | 374               | 289              | 303                 | 233              | 248                | 190              | 204               | 156              | 25,9              | 18,0             |
| <sup>23</sup> V             | 79,9              | 509              | 418               | 323              | 338                 | 260              | 276                | 212              | 228               | 174              | 28,9              | 20,0             |
| <sup>24</sup> Cr            | 90,4              | 70,1             | 464               | 358              | 376                 | 289              | 307                | 235              | 253               | 193              | 32,1              | 22,2             |
| <sup>25</sup> Mn            | 102               | 79,0             | 64,6              | 396              | 416                 | 320              | 340                | 260              | 280               | 213              | 34,8              | 24,3             |
| <sup>26</sup> Fe            | 114               | 88,5             | 72,4              | 55,7             | 58,5                | 353              | 374                | 287              | 308               | 235              | 39,1              | 27,8             |
| <sup>27</sup> Co            | 127               | 98,7             | 80,8              | 62,2             | 65,3                | 50,0             | 53,2               | 315              | 338               | 258              | 42,9              | 32,0             |
| <sup>28</sup> Ni            | 141               | 110              | 89,8              | 69,1             | 72,5                | 55,6             | 59,1               | 45,1             | 48,5              | 282              | 47,0              | 35,1             |
| <sup>29</sup> Cu            | 156               | 121              | 99,4              | 76,5             | 80,3                | 61,5             | 65,4               | 49,9             | 53,7              | 40,8             | 51,2              | 39,0             |
| <sup>30</sup> Zn            | 173               | 134              | 110               | 84,4             | 88,6                | 67,9             | 72,2               | 55,1             | 59,2              | 45,0             | 55,7              | 43,5             |
| <sup>31</sup> Ga            | 190               | 147              | 121               | 92,8             | 97,5                | 74,7             | 79,4               | 60,6             | 65,1              | 49,5             | 60,4              | 48,0             |
| <sup>32</sup> Ge            | 208               | 162              | 132               | 102              | 107                 | 81,9             | 87,0               | 66,4             | 71,4              | 54,3             | 65,5              | 51,0             |
| <sup>33</sup> As            | 228               | 177              | 145               | 111              | 117                 | 89,5             | 95,1               | 72,6             | 78,1              | 59,3             | 70,5              | 55,0             |
| <sup>34</sup> Se            | 248               | 193              | 158               | 121              | 127                 | 97,6             | 104                | 79,9             | 85,1              | 64,7             | 75,8              | 61,0             |
| <sup>35</sup> Br            | 270               | 210              | 172               | 132              | 139                 | 106              | 113                | 86,1             | 92,6              | 70,4             | 81,5              | 66,0             |
| <sup>36</sup> Kr            | 293               | 227              | 186               | 143              | 150                 | 115              | 122                | 93,4             | 100               | 76,4             | 87,4              | 70,0             |
| <sup>37</sup> Rb            | 317               | 246              | 201               | 155              | 163                 | 125              | 132                | 101              | 109               | 82,6             | 90,0              | 77,0             |
| <sup>38</sup> Sr            | 342               | 266              | 217               | 167              | 176                 | 135              | 143                | 109              | 117               | 89,2             | 96,0              | 83,0             |
| <sup>39</sup> Y             | 369               | 286              | 234               | 180              | 189                 | 145              | 154                | 118              | 126               | 96,1             | 100               | 89,0             |
| <sup>40</sup> Zr            | 397               | 308              | 252               | 194              | 204                 | 156              | 166                | 127              | 136               | 103              | 16,7              | 95,0             |
| <sup>41</sup> Nb            | 426               | 331              | 271               | 208              | 219                 | 168              | 178                | 136              | 146               | 111              | 18,0              | 100              |
| <sup>42</sup> Mo            | 456               | 354              | 290               | 223              | 234                 | 180              | 191                | 146              | 157               | 119              | 19,3              | 14,6             |
| <sup>43</sup> Tc            | 488               | 379              | 310               | 239              | 251                 | 192              | 204                | 156              | 168               | 127              | 20,7              | 15,5             |
| <sup>44</sup> Ru            | 522               | 405              | 332               | 255              | 268                 | 205              | 218                | 167              | 179               | 136              | 22,0              | 16,0             |
| <sup>45</sup> Rh            | 557               | 432              | 354               | 272              | 286                 | 219              | 233                | 178              | 191               | 145              | 23,5              | 17,5             |
| <sup>46</sup> Pd            | 593               | 460              | 377               | 290              | 304                 | 233              | 248                | 189              | 204               | 155              | 24,5              | 18,5             |
| <sup>47</sup> Ag            | 631               | 480              | 401               | 309              | 324                 | 248              | 264                | 201              | 217               | 165              | 26,6              | 19,5             |
| <sup>48</sup> Cd            | 670               | 520              | 426               | 328              | 344                 | 264              | 280                | 214              | 230               | 175              | 28,3              | 20,0             |
| <sup>49</sup> In            | 711               | 552              | 452               | 348              | 365                 | 280              | 298                | 227              | 244               | 186              | 30,0              | 21,0             |
| <sup>50</sup> Sn            | 754               | 585              | 479               | 369              | 387                 | 297              | 315                | 241              | 259               | 197              | 32,5              | 22,0             |
| <sup>51</sup> Sb            | 798               | 620              | 507               | 390              | 410                 | 314              | 334                | 255              | 274               | 208              | 33,7              | 23,0             |
| <sup>52</sup> Te            | 845               | 655              | 537               | 413              | 433                 | 332              | 353                | 269              | 290               | 220              | 35,6              | 24,0             |
| <sup>53</sup> I             | 892               | 692              | 567               | 436              | 458                 | 351              | 375                | 285              | 307               | 233              | 38,0              | 25,5             |
| <sup>54</sup> Xe            | 786               | 731              | 598               | 460              | 483                 | 370              | 394                | 300              | 323               | 245              | 39,7              | 26,5             |
| <sup>55</sup> Cs            | 816               | 759              | 621               | 478              | 502                 | 385              | 409                | 312              | 335               | 255              | 41,3              | 28,0             |
| <sup>56</sup> Ba            | 599               | 700              | 654               | 508              | 528                 | 405              | 430                | 328              | 353               | 268              | 43,8              | 24,0             |
| <sup>57</sup> La            | 214               | 730              | 687               | 529              | 555                 | 426              | 452                | 345              | 371               | 282              | 45,5              | 31,0             |
| <sup>58</sup> Ce            | 226               | 517              | 602               | 556              | 583                 | 447              | 475                | 363              | 390               | 296              | 48,5              | 32,0             |
| <sup>59</sup> Pr            | 237               | 188              | 447               | 583              | 612                 | 469              | 499                | 381              | 409               | 311              | 50,7              | 33,5             |
| <sup>60</sup> Nd            | 249               | 197              | 469               | 540              | 534                 | 492              | 523                | 399              | 429               | 326              | 53,0              | 35,0             |
| <sup>61</sup> Pm            | 262               | 207              | 172               | 565              | 399                 | 516              | 548                | 418              | 450               | 342              | 55,4              | 36,5             |
| <sup>62</sup> Sm            | 275               | 218              | 181               | 399              | 418L <sub>III</sub> | 485              | 470L <sub>II</sub> | 438              | 471L <sub>I</sub> | 358              | 57,9              | 38,0             |
| <sup>63</sup> Eu            | 289               | 228              | 190               | 417              | 156                 | 500              | 358                | 458              | 410               | 374              | 60,6              | 39,5             |

| Получающий элемент | Cr $K_{\alpha 1}$ | Cr $K_{\beta 1}$ | Fe $K_{\alpha 1}$ | Fe $K_{\beta 1}$ | Co $K_{\alpha 1}$ | Co $K_{\beta 1}$ | Ni $K_{\alpha 1}$ | Ni $K_{\beta 1}$ | Cu $K_{\alpha 1}$ | Cu $K_{\beta 1}$ | Mo $K_{\alpha 1}$ | Mo $K_{\beta 1}$ |
|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| <sup>64</sup> Gd   | 304               | 239              | 200               | 156              | 164               | 353              | 374               | 430              | 429               | 392              | 64,5              | 41,5             |
| <sup>65</sup> Tb   | 318               | 351              | 209               | 163              | 172               | 369              | 142               | 450              | 324               | 409              | 67,3              | 43,0             |
| <sup>66</sup> Dy   | 333               | 262              | 219               | 170              | 180               | 140              | 149               | 314              | 339               | 385              | 70,3              | 44,5             |
| <sup>67</sup> Ho   | 348               | 274              | 229               | 178              | 188               | 146              | 156               | 328              | 129               | 270              | 73,4              | 46,5             |
| <sup>68</sup> Er   | 364               | 287              | 239               | 186              | 197               | 153              | 163               | 126              | 135               | 281              | 76,5              | 48,5             |
| <sup>69</sup> Tm   | 380               | 299              | 250               | 195              | 205               | 160              | 170               | 131              | 141               | 293              | 79,7              | 50,0             |
| <sup>70</sup> Yb   | 397               | 312              | 261               | 204              | 214               | 167              | 177               | 137              | 147               | 113              | 85,1              | 52,0             |
| <sup>71</sup> Lu   | 414               | 326              | 272               | 212              | 224               | 174              | 185               | 143              | 154               | 119              | 86,5              | 54,0             |
| <sup>72</sup> Hf   | 428               | 335              | 279               | 217              | 228               | 177              | 188               | 145              | 156               | 120              | 84,0              | 57,0             |
| <sup>73</sup> Ta   | 447               | 350              | 291               | 226              | 238               | 184              | 196               | 151              | 162               | 125              | 88,0              | 59,0             |
| <sup>74</sup> W    | 466               | 365              | 304               | 236              | 248               | 192              | 205               | 158              | 170               | 130              | 92,1              | 62,0             |
| <sup>75</sup> Re   | 485               | 380              | 317               | 246              | 259               | 200              | 213               | 164              | 177               | 136              | 96,4              | 65,0             |
| <sup>76</sup> Os   | 506               | 396              | 330               | 256              | 270               | 209              | 222               | 171              | 184               | 141              | 101               | 68,0             |
| <sup>77</sup> Ir   | 527               | 418              | 343               | 267              | 281               | 217              | 231               | 178              | 192               | 147              | 105               | 71,0             |
| <sup>78</sup> Pt   | 548               | 430              | 357               | 278              | 292               | 226              | 241               | 185              | 200               | 153              | 110               | 74,0             |
| <sup>79</sup> Au   | 570               | 447              | 372               | 289              | 304               | 235              | 251               | 193              | 208               | 159              | 115               | 77,0             |
| <sup>80</sup> Hg   | 593               | 464              | 386               | 300              | 316               | 244              | 261               | 201              | 216               | 166              | 120               | 81,0             |
| <sup>81</sup> Tl   | 616               | 483              | 402               | 312              | 328               | 254              | 271               | 208              | 224               | 172              | 125               | 82,0             |
| <sup>82</sup> Pb   | 640               | 501              | 417               | 324              | 341               | 264              | 281               | 216              | 233               | 178              | 130               | 86,0             |
| <sup>83</sup> Bi   | 664               | 520              | 433               | 336              | 354               | 274              | 292               | 225              | 242               | 186              | 136               | 89,0             |
| <sup>84</sup> Po   | 689               | 540              | 449               | 349              | 368               | 284              | 303               | 233              | 251               | 193              | 141               | 93,0             |
| <sup>85</sup> At   | 715               | 560              | 466               | 362              | 381               | 295              | 314               | 242              | 260               | 200              | 118               | 96,8             |
| <sup>86</sup> Rn   | 741               | 581              | 483               | 375              | 395               | 306              | 326               | 251              | 270               | 207              | 124               | 100              |
| <sup>87</sup> Fr   | 936               | 726              | 602               | 464              | 489               | 375              | 401               | 306              | 330               | 252              | 97,8              | 105              |
| <sup>88</sup> Ra   | 982               | 764              | 632               | 487              | 514               | 394              | 421               | 321              | 347               | 264              | 101               | 110              |
| <sup>89</sup> Ac   | 1030              | 802              | 663               | 511              | 539               | 414              | 442               | 337              | 364               | 277              | 104               | 100              |
| <sup>90</sup> Th   | 1080              | 841              | 696               | 536              | 565               | 434              | 463               | 354              | 382               | 291              | 108               | 76,0             |
| <sup>91</sup> Pa   | 1130              | 881              | 729               | 562              | 593               | 455              | 486               | 371              | 400               | 305              | 115               | 79,0             |
| <sup>92</sup> U    | —                 | 923              | 764               | 589              | 621               | 476              | 509               | 388              | 419               | 319              | 124L              | 81,0             |
| <sup>93</sup> Np   | —                 | 967              | 800               | 616              | 650               | 499              | 533               | 407              | 439               | 334              | 57,6              | 84,0             |
| <sup>94</sup> Pu   | —                 | 1010             | 837               | 645              | 681               | 522              | 557               | 426              | 459               | 350              | 60,3              | 87,0             |

### 35.7. ВТОРИЧНЫЕ СПЕКТРЫ И ЭФФЕКТЫ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Атомы мишени при бомбардировке рентгеновскими фотонами с энергией  $h\nu \geq \epsilon_n$  (где  $\epsilon_n$  — энергия электрона на  $n$ -м уровне) могут перейти в возбужденное состояние и образовать вакансию на внутреннем электронном уровне. При этом мишень испускает так называемое *флуоресцентное* (характеристическое) излучение, соответствующее переходу электронов на вакантный уровень. Тормозное излучение при этом отсутствует. Максимальную длину волны первичного излучения, вызывающего возбуждение флуоресцентного излучения данной серии, называют *граничной* (или *краем* *полосы поглощения*); ее можно легко рассчитать из выражения  $h\nu_{\text{гр}} = hc/\lambda_{\text{гр}} = e(n, l, j)$ , где  $n, l$  и  $j$  — главное, азимутальное и внутреннее квантовое число.

Выход флуоресценции для различных серий дан в табл. 35.7. Здесь приведены в основном средние экспериментальные выходы флуоресценции для атомов однократно ионизованных в  $K$ -оболочке ( $\omega_K$ ),  $L$ -оболочке ( $\omega_L$ ) и  $M$ -оболочке ( $\omega_M$ ), а также выходы флуоресценции при переносе дырки  $K$ -оболочки в  $L$ -оболочку ( $\omega_{KL}$ ) и дырки  $L$ -оболочки в  $M$ -оболочку ( $\omega_{LM}$ ).

Рентгеновскую флуоресцентную спектроскопию широко используют для определения содержания различных элементов в анализируемых материалах на глубину, соответствующую  $10^4$ — $3 \cdot 10^5$  атомным слоям. Для этих

же целей используют электроны, непосредственно вырванные из атома при прохождении рентгеновского излучения через вещество. Этот метод получил название *электронной спектроскопии для химического анализа* (ЭСХА) и позволяет исследовать 2—10 атомных слоев.

Переход атома в невозбужденное состояние может сопровождаться испусканием не фотона, а электрона. Этот переход называют *вторичным фотоэффектом* или *оже-эффектом*, а соответствующие электроны — *оже-электронами*. Так как энергетический спектр этих электронов определяется разностью энергий разных энергетических состояний атомов, он также является «паспортом» данного сорта атомов, как и характеристическое рентгеновское излучение. Вероятность испускания оже-электронов для атомов с  $Z < 33$  даже выше, чем вероятность излучательных переходов.

Спектры вылетающих из образца фото- и оже-электронов чувствительны к электронной структуре, химическим связям, фазовому составу и другим характеристикам кристалла, содержащего эмиттирующий элемент.

Влияние индивидуальных особенностей строения молекул, кристаллов сказывается прежде всего на энергетическом положении  $K_{\alpha}$ -линии. Ширина  $K_{\alpha}$ -линии при переходе от одного соединения к другому меняется незначительно. Однако ширина  $K_{\alpha}$ -линии может дать полезную информацию о симметрии ближайшего окружения атома в веществе.

В рентгеновской спектроскопии основные диаграммные линии нередко сопровождаются сателлитными линиями — слабыми линиями как с коротковолновой сто-

роны (коротковолновые спутники), так и с длинноволновой (длинноволновые спутники). Спутники сильно чувствительны к строению индивидуальных веществ, причем нередко их чувствительность к факторам электронного или геометрического строения превосходит чувствительность основных диаграммных линий. Значительное число спутников появляется в результате электронных переходов в многократно ионизованных атомах. В результате таких переходов появляются, как правило, коротковолновые спутники; например, группа спутников  $K_{\alpha}$ -линии ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и  $\alpha_4$ ) возникает при переходах между состояниями в двукратно ионизованных атомах  $KL-L^2$ , при этом сама группа из пяти линий возникает благодаря наличию  $LS$ -взаимодействия.

Часть спутников находится далеко от основной линии и не оказывает влияния на ее форму, однако некоторые спутники могут существенно повлиять на форму  $K_{\alpha 1,2}$ -линий, особенно в полосе ее «хвостов».

Кроме коротковолновых в  $K_{\alpha}$ -линии могут наблюдаться и длинноволновые спутники, так как в процессе испускания спутничной линии часть ее энергии может быть унесена оже-электронами. Эти спутники, как правило, мало сказываются на форме основной линии.

Химические сдвиги спутников, так же как и основных  $K_{\alpha}$ -линий, могут быть использованы для идентификации зарядового состояния исследуемого атома (табл. 35.8).

| L-серия          |               |            |                  |               |            |                  |               |            |
|------------------|---------------|------------|------------------|---------------|------------|------------------|---------------|------------|
| Элемент          | $\omega_{KL}$ | $\omega_L$ | Элемент          | $\omega_{KL}$ | $\omega_L$ | Элемент          | $\omega_{KL}$ | $\omega_L$ |
| <sup>23</sup> V  | —             | 0,235      | <sup>55</sup> Cs | —             | 8,90       | <sup>73</sup> Ta | 28,0          | 22,5       |
| <sup>25</sup> Mn | —             | 0,295      | <sup>56</sup> Ba | 14,8          | 9,3        | <sup>74</sup> W  | 31,0          | 29,8       |
| <sup>29</sup> Cu | —             | 0,56       | <sup>57</sup> La | 12,3          | 11,0       | <sup>75</sup> Re | 30,0          | —          |
| <sup>31</sup> Ga | —             | 0,64       | <sup>58</sup> Ce | 16,0          | 16,3       | <sup>76</sup> Os | 32,0          | 34,8       |
| <sup>36</sup> Kr | —             | 7,50       | <sup>59</sup> Pr | 12,3          | 16,7       | <sup>77</sup> Ir | 31,0          | 30,0       |
| <sup>37</sup> Rb | 1,30          | 1,10       | <sup>60</sup> Nd | 16,0          | 17,0       | <sup>78</sup> Pt | 36,0          | 32,0       |
| <sup>39</sup> Y  | —             | 5,70       | <sup>61</sup> Pm | 18,5          | —          | <sup>79</sup> Au | 28,7          | 43,0       |
| <sup>40</sup> Zr | 3,40          | —          | <sup>62</sup> Sm | 17,0          | 18,8       | <sup>80</sup> Hg | 41,0          | 40,0       |
| <sup>41</sup> Nb | 2,20          | —          | <sup>63</sup> Eu | 17,0          | 17,0       | <sup>81</sup> Tl | 44,0          | 41,0       |
| <sup>42</sup> Mo | —             | 6,70       | <sup>64</sup> Gd | 18,0          | 19,8       | <sup>82</sup> Pb | 39,5          | 29,7       |
| <sup>46</sup> Pd | 4,70          | —          | <sup>65</sup> Tb | 19,5          | 19,4       | <sup>83</sup> Bi | 41,4          | 33,0       |
| <sup>47</sup> Ag | 4,40          | 6,59       | <sup>66</sup> Dy | 21,0          | —          | <sup>88</sup> Ra | —             | 40,0       |
| <sup>48</sup> Cd | 5,50          | —          | <sup>67</sup> Ho | 17,0          | —          | <sup>90</sup> Th | —             | 48,8       |
| <sup>49</sup> In | 6,5           | —          | <sup>68</sup> Er | 21,0          | —          | <sup>91</sup> Pa | —             | 50,0       |
| <sup>50</sup> Sn | 6,4           | —          | <sup>69</sup> Tm | 23,0          | —          | <sup>92</sup> K  | 40,9          | 53,0       |
| <sup>51</sup> Sb | 7,0           | 11,9       | <sup>70</sup> Yb | 25,0          | —          | <sup>93</sup> Np | —             | 49,0       |
| <sup>52</sup> Te | 7,3           | 12,2       | <sup>71</sup> Lu | 26,0          | 29,0       | <sup>94</sup> Pu | —             | 56,6       |
| <sup>54</sup> Xe | 9,1           | —          | <sup>72</sup> Hf | 29,0          | 29,0       | <sup>95</sup> Cm | —             | 53,1       |

| M-серия          |               |            |                  |               |
|------------------|---------------|------------|------------------|---------------|
| Элемент          | $\omega_{LM}$ | $\omega_M$ | Элемент          | $\omega_{LM}$ |
| <sup>76</sup> Os | 1,3           | —          | <sup>88</sup> Bi | 3,0           |
| <sup>79</sup> Au | 2,4           | 2,3        | <sup>92</sup> U  | —             |
| <sup>82</sup> Pb | 2,6           | 2,9        |                  | 6,0           |

Таблица 35.7. Выход флуоресценции на один акт фотоэффекта, % [3]

| K-серия          |            |                  |            |                  |            |                  |            |
|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
| Элемент          | $\omega_K$ | Элемент          | $\omega_K$ | Элемент          | $\omega_K$ | Элемент          | $\omega_K$ |
| <sup>4</sup> Be  | 0,0304     | <sup>24</sup> Cr | 28,30      | <sup>44</sup> Ru | 79,3       | <sup>64</sup> Gd | 93,4       |
| <sup>5</sup> B   | 0,056      | <sup>25</sup> Mn | 31,30      | <sup>45</sup> Rh | 80,7       | <sup>65</sup> Tb | 93,7       |
| <sup>6</sup> C   | 0,26       | <sup>26</sup> Fe | 34,20      | <sup>46</sup> Pd | 81,9       | <sup>66</sup> Dy | 94,3       |
| <sup>7</sup> N   | 0,60       | <sup>27</sup> Co | 36,60      | <sup>47</sup> Ag | 83,4       | <sup>67</sup> Ho | 94,3       |
| <sup>8</sup> O   | 0,94       | <sup>28</sup> Ni | 41,40      | <sup>48</sup> Cd | 84,0       | <sup>68</sup> Er | 94,5       |
| <sup>9</sup> F   | 1,13       | <sup>29</sup> Cu | 44,30      | <sup>49</sup> In | 85,0       | <sup>69</sup> Tm | 94,8       |
| <sup>10</sup> Ne | 1,82       | <sup>30</sup> Zn | 47,90      | <sup>50</sup> Sn | 85,9       | <sup>70</sup> Yb | 95,0       |
| <sup>11</sup> Na | 2,60       | <sup>31</sup> Ga | 52,80      | <sup>51</sup> Sb | 86,7       | <sup>71</sup> Lu | 95,2       |
| <sup>12</sup> Mg | 3,36       | <sup>32</sup> Ge | 55,40      | <sup>52</sup> Te | 85,7       | <sup>72</sup> Hf | 95,4       |
| <sup>13</sup> Al | 3,80       | <sup>33</sup> As | 58,80      | <sup>53</sup> I  | 88,2       | <sup>73</sup> Ta | 95,6       |
| <sup>14</sup> Si | 4,30       | <sup>34</sup> Se | 59,60      | <sup>54</sup> Xe | 89,4       | <sup>74</sup> W  | 95,7       |
| <sup>15</sup> P  | 6,00       | <sup>35</sup> Br | 62,20      | <sup>55</sup> Cs | 88,9       | <sup>75</sup> Re | 95,9       |
| <sup>16</sup> S  | 8,20       | <sup>36</sup> Kr | 66,0       | <sup>56</sup> Ba | 90,1       | <sup>76</sup> Os | 96,1       |
| <sup>17</sup> Cl | 9,55       | <sup>37</sup> Rb | 66,9       | <sup>57</sup> La | 90,6       | <sup>77</sup> Ir | 96,2       |
| <sup>18</sup> Ar | 12,20      | <sup>38</sup> Sr | 70,2       | <sup>58</sup> Ce | 91,1       | <sup>78</sup> Pt | 96,7       |
| <sup>19</sup> K  | 11,50      | <sup>39</sup> Y  | 71,1       | <sup>59</sup> Pr | 91,5       | <sup>79</sup> Au | 96,4       |
| <sup>20</sup> Ca | 13,80      | <sup>40</sup> Zr | 73,0       | <sup>60</sup> Nd | 92,0       | <sup>80</sup> Hg | 95,8       |
| <sup>21</sup> Sc | 19,00      | <sup>41</sup> Nb | 74,8       | <sup>61</sup> Pm | 92,4       | <sup>82</sup> Pb | 97,2       |
| <sup>22</sup> Ti | 22,10      | <sup>42</sup> Mo | 76,4       | <sup>62</sup> Sm | 92,8       | <sup>92</sup> U  | 97,0       |
| <sup>23</sup> V  | 25,30      | <sup>43</sup> Tc | 77,9       | <sup>63</sup> Eu | 92,5       | —                | —          |

Таблица 35.8. Сдвиги  $\text{Cr } K_{\beta 1,3}$ - и  $\text{Sn } L_{\beta 2}$ -линий [4]

| Ион              | Образец                           | $E$ , эВ | Ион              | Образец                                   | $E$ , эВ |
|------------------|-----------------------------------|----------|------------------|-------------------------------------------|----------|
| $\text{Cr}^{3+}$ | $\text{CrF}_3$                    | +0,66    | $\text{Sn}^{2+}$ | $\text{SnCl}_2$                           | +0,176   |
|                  | $\text{CrCl}_3$                   | +0,56    |                  | $\text{SnC}_2\text{O}_4$                  | +0,144   |
|                  | $\text{CrBr}_3$                   | +0,46    |                  | $\text{SnHPO}_4$                          | +0,098   |
|                  | $\text{Cr}_2\text{O}_3$           | +0,40    |                  | $\text{SnS}$                              | +0,063   |
|                  | $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$        | +0,77    |                  | $\text{SnCl}_4$                           | -0,085   |
|                  | $\text{CuCr}_2\text{S}_4$         | +0,63    | $\text{Sn}^{4+}$ | $\text{PbSnO}_3$                          | -0,0179  |
| $\text{Cr}^{4+}$ | $\text{CoCr}_2\text{S}_4$         | +0,71    |                  | $\text{SnO}_2$                            | -0,180   |
|                  | $\text{CrCr}_2\text{S}_4$         | +0,64    |                  | $\text{CaSnOSiO}_4$                       | -0,198   |
| $\text{Cr}^{5+}$ | $\text{CrO}_2$                    | +0,12    |                  |                                           |          |
|                  | $\text{Cr}_2\text{O}_5$           | -0,39    |                  |                                           |          |
| $\text{Cr}^{6+}$ | $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ | -0,84    | $\text{Cr}^{6+}$ | $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$         | -0,84    |
|                  | $\text{Fe}_2(\text{CrO}_4)_3$     | -0,74    |                  | $\text{Na}_2\text{CrO}_4$                 | -0,84    |
|                  | $\text{K}_2\text{CrO}_4$          | -0,91    |                  | $\text{Cu}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \times$ | -0,79    |
|                  | $\times 2\text{H}_2\text{O}$      |          |                  | $\text{CaCrO}_4$                          | -0,64    |
|                  | $\text{BaCrO}_4$                  | -0,86    |                  | $\text{BaCrO}_4$                          | -0,86    |
|                  | $\text{CrO}_3$                    | -0,83    |                  |                                           |          |
|                  |                                   |          |                  |                                           |          |
|                  |                                   |          |                  |                                           |          |

Примечание. Положения  $\text{Cr } K_{\beta 1,3}$  и  $\text{Sn } L_{\beta 2}$  соответственно в чистом Cr и Sn приняты за 0 эВ.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. М.: Наука. Т. 1, 1981.
2. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. академика И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

3. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральный справочник. М.: Наука, 1982.
4. Мазалов Л. Н., Трейгер Б. А. Эффекты химической связи в рентгеноспектральном анализе//Журн. структурной химии. 1983. Т. 24, № 2. С. 128—155.

## Глава 36

# ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Ю. П. Никитин

### 36.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

К разряду *элементарных частиц* следовало бы отнести наиболее простые, неделимые частицы материи. Исследования строения атомов и атомных ядер показали, что эти микрообъекты являются составными. Электроны, находящиеся на периферии атома, протоны и нейтроны, образующие атомные ядра, стали называть элементарными частицами, подчеркивая тем самым, что они более простые частицы, чем атомы и ядра атомов. К элементарным частицам причислили фотоны — кванты электромагнитного поля, а также нейтрино, появляющиеся в процессах  $\beta$ -распада ядер. Дальнейшие исследования показали, что в процессах взаимодействия элементарных частиц образуются и другие типы частиц, большинство из которых взаимодействуют с протонами и нейтронами и между собой с такой же интенсивностью, как протоны и нейтроны в ядрах атомов. Эту большую группу частиц также называли элементарными. Однако оказалось, что большинство частиц, отнесенных к разряду элементарных, нестабильны и могут в результате распада превращаться в другие элементарные частицы. При этом нельзя считать, что продукты распада более элементарны, чем сами распадающиеся частицы, поскольку, как правило, наблюдается несколько различных каналов распада одной и той же частицы. Поэтому нельзя заключить, что нестабильные частицы состоят из частиц — продуктов распада. Обнаружены были также частицы, напоминающие по своим свойствам электроны, но являющиеся нестабильными и существенно более массивными, чем электрон. Установлено существование трех разновидностей нейтрино.

Таким образом, к разряду элементарных частиц в настоящее время принято относить все микрочастицы, за исключением ядер атомов с массовым числом больше единицы [1]. Имеются серьезные основания считать, что большинство «элементарных» частиц обладает внутренней структурой, но в то же время у таких частиц, как, например, электрон, нейтрино, внутренняя структура не обнаружена при исследовании до расстояний порядка  $10^{-16}$  см [2, 3].

### 36.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В исследованной области энергий, которая соответствует пространственному разрешению порядка  $10^{-15}$ — $10^{-16}$  см, различают четыре основных вида взаимодействий частиц: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное [1, 2]. В гравитационных взаимодействиях участвуют все элементарные частицы, но гравитационные силы очень слабы, так как малы массы элемен-

тарных частиц. Например, гравитационное взаимодействие двух протонов в  $10^{-36}$  раз слабее их электростатического кулоновского взаимодействия. Все электрически заряженные частицы и некоторые нейтральные участвуют в электромагнитных взаимодействиях. Самую большую группу образуют частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. В частности, сильные взаимодействия обусловлены ядерными силами, действующими между протонами и нейтронами на расстояниях, меньших  $10^{-13}$  см, обеспечивающими стабильность атомных ядер.

Сильновзаимодействующие частицы называют *адронами*. Известно несколько сот их разновидностей. Адроны участвуют во всех видах взаимодействий. Среди них различают *мезоны*, частицы с целочисленным значением спинового квантового числа, и *барионы*, частицы с полуцелым спинном. Все адроны, за исключением, может быть, протона, нестабильны относительно сильного, электромагнитного или слабого взаимодействия. Адроны, нестабильные относительно сильного взаимодействия, принято называть *резонансами*.

Частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, образуют два небольших семейства. Одно из них представляют *лептоны* — электрон, мюон,  $\tau$ -лептон, а также электронное, мюонное и  $\tau$ -нейтрино. Другое семейство до последнего времени представлял фотон — безмассовая частица со спином, равным единице, являющаяся переносчиком электромагнитного взаимодействия, квантом электромагнитного поля. В 1983 г. были открыты массивные заряженные ( $W^{\pm}$ ) и нейтральные ( $Z^0$ ) бозоны — частицы со спином, равным единице, являющиеся переносчиками слабого взаимодействия. Фотон,  $W^{\pm}$ - и  $Z^0$ -бозоны относят к семейству *векторных калибровочных бозонов*.

*Слабое взаимодействие* ответственно за распады адронов и лептонов, стабильных относительно сильного и электромагнитного взаимодействий. Эффективный радиус слабого взаимодействия не превышает  $10^{-16}$  см. Поэтому на больших расстояниях оно существенно слабее электромагнитного, которое, в свою очередь, до расстояний порядка  $10^{-13}$  см слабее сильного взаимодействия. На расстояниях, меньших  $10^{-10}$  см, слабые и электромагнитные взаимодействия, как выяснилось в последнее время, образуют *единое электрослабое взаимодействие*. Возможно, что не только слабое и электромагнитное взаимодействия имеют единую природу, но и остальные виды взаимодействия представляют собой проявление некоторого единого фундаментального взаимодействия. Свидетельством единой природы слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий могло бы быть экспериментальное доказательство нестабильности протона.

Большинство адронов и все известные лептоны имеют партнеров с такими же массой и временем жизни, но противоположных по ряду других характеристик. Эти партнеры называются *античастицами*.

### 36.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ И ВНУТРЕННИЕ СИММЕТРИИ

Во всех взаимодействиях элементарных частиц, включая соударения и распады, выполняются законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения (в квантовомеханической трактовке). Эти законы, как известно, являются следствием однородности пространства-времени Минковского и изотропности трехмерного пространства, в котором осуществляются процессы взаимодействия. Кроме указанных законов сохранения, связанных с симметрией пространства-времени, в процессах взаимодействия элементарных частиц с той или иной степенью строгости выполняется еще ряд законов сохранения, обусловленных внутренними квантовыми числами частиц (иначе, внутренними симметриями), которые были установлены экспериментально [1].

**Строгие законы сохранения квантовых чисел элементарных частиц** имеют место во всех видах взаимодействия. К таким законам, нарушение которых пока не обнаружено, относятся: *сохранение электрического заряда* — суммарный электрический заряд частиц в начале процесса взаимодействия и суммарный электрический заряд частиц, образующихся в результате взаимодействия, совпадают (электрический заряд элементарной частицы по абсолютному значению кратен заряду электрона  $e$ ); *сохранение барионного заряда* — во всех процессах взаимодействия изменение числа барионов должно совпадать с изменением числа антибарионов. Барионам присписывается барионный заряд  $B=1$ , антибарионам  $B=-1$ . Барионный заряд остальных частиц  $B=0$ ; *электронный, мюонный и  $\tau$ -лептонный заряды* присписываются соответственно электрону и электронному нейтрину  $\nu_e (l_e=1)$ , мюону и мюонному нейтрину  $\nu_\mu (l_\mu=1)$ ,  $\tau$ -лептону и  $\tau$ -нейтрину  $\nu_\tau (l_\tau=1)$ . Антилептонам присписываются противоположные по знаку лептонные заряды. Для остальных известных частиц  $l_e=l_\mu=l_\tau=0$ . Экспериментальные данные свидетельствуют о сохранении лептонных зарядов всех трех разновидностей в отдельности. Имеются теоретические основания полагать, что законы сохранения барионного и лептонных зарядов не являются строгими [3].

**Нестрогие законы сохранения квантовых чисел элементарных частиц** имеют место в одних типах взаимодействий и нарушаются в других. К таким квантовым числам относятся: изотопический спин, гиперзаряд, пространственную и зарядовую четности,  $G$ -четность и ряд других.

**Изотопический спин  $I$**  представляет собой внутреннюю характеристику адрона, отражающую инвариантность сильных взаимодействий относительно вращений в воображаемом трехмерном изоспиновом пространстве. Квантовое число  $I$  определяет значение квадрата вектора изотопического спина,  $I^2=I(I+1)$ , присписываемого мультиплету адронов с одинаковыми свойствами по отношению к сильным взаимодействиям и с примерно одинаковыми массами и другими характеристиками, кроме электрических зарядов. Число адронов в изотопическом мультиплете составляет  $2I+1$ . В процессах сильного взаимодействия сохраняется квантовое число  $I$  полного изотопического спина частиц, участвующих в реакции, и квантовое число третьей проекции полного изотопического спина  $I_3$ , которое определяется как алгебраическая сумма проекций изотопического спина взаимодействующих адронов. В электромагнитных взаимодействиях адронов полный изотопический спин не сохраняется, но сохраняется его проекция. В слабых взаимодействиях нарушаются законы сохранения как  $I$ , так и  $I_3$ .

**Странность  $S$**  как внутреннее квантовое число присписывается некоторым мезонам (каонам) и барионам, которые принято называть *гиперонами*. Закон сохранения

странности как аддитивного квантового числа установлен эмпирически в процессах сильного и электромагнитного взаимодействий. Слабые взаимодействия нарушают этот закон. Сохранение странности приводит к стабильности (относительно сильных взаимодействий) каонов и наименее массивных гиперонов, которые распадаются в результате слабого или электромагнитного ( $\Sigma^0$ -гиперон) взаимодействия.

**Очарование  $c$ , прелесть  $b$**  — новые типы аддитивных квантовых чисел, присписываемых наиболее тяжелым из открытых недавно адронов. Подобно странности эти квантовые числа сохраняются в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняются в слабых взаимодействиях.

**Гиперзаряд  $Y$**  есть сумма квантовых чисел:  $Y=B+S+c+b$ , он связан с электрическим зарядом  $Q$  (в единицах  $|e|$ ) и проекцией изотопического спина  $I_3$  следующим соотношением:  $Q=I_3+Y/2$ .

**Пространственная четность  $P$**  элементарной частицы определяется характером преобразования ее волновой функции при зеркальном отражении пространственных координат в системе отсчета, где свободная частица покоится. Если частица обладает определенной четностью, то  $P=\pm 1$ .

**Зарядовая четность  $C$**  является внутренним квантовым числом так называемых истинно нейтральных частиц, у которых античастицы и частицы совпадают, а также нейтральных составных систем, которые при зарядовом сопряжении (замене частиц античастицами) переходят сами в себя. В слабых взаимодействиях нарушаются законы сохранения  $P$ - и  $C$ -четности, но в большинстве случаев сохраняется комбинация  $CP$ -четность. В распадах нейтральных каонов нарушается и  $CP$ -четность.

**$G$ -четность** определяется как собственное значение оператора  $G=C \exp(i\pi I_2)$ , где  $I_2$  — вторая проекция изотопического спина,  $G$ -четность представляет собой внутреннее квантовое число адронов или систем адронов с нулевой странностью (очарованием, прелестью) и нулевым барионным зарядом.  $G$ -четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.

### 36.4. КВАРКОВАЯ СТРУКТУРА АДРОНОВ

Все обнаруженные виды адронов могут быть «сконструированы» из небольшого числа гипотетических фундаментальных частиц, получивших название *кварки* [2, 3]. Минимальное число сортов (ароматов) кварков, которое необходимо для этого, равно пяти. Кваркам присписываются такие квантовые числа, как спин, изотопический спин, странность, очарование, прелесть, электрический и барионный заряды. Выбор спинового квантового числа кварка, равного  $S=1/2$ , обеспечивает возможность конструирования адронных состояний с любым целочисленным или полуцелым значением спина. Два кварка из пяти,  $u$  и  $d$ , образуют изотопический дублет, т. е. им присписывается изотопический спин  $I=1/2$  и его проекция  $I_3=\pm 1/2$ , что позволяет сконструировать любой изотопический мультиплет адронов. Кварки  $s$ -,  $c$ - и  $b$ -типов являются изосинглетами ( $I=0$ ) и характеризуются соответственно квантовыми числами странностью  $S$ , очарованием  $c$  и прелестью  $b$ .

Существуют веские теоретические аргументы в пользу существования шестого сорта кварков  $t$  со специфическим внутренним квантовым числом  $t$ . Одновременно предполагается существование соответствующих антикварков. Квантовые числа кварков представлены в табл. 36.1. Мезоны можно составить из кварка и антикварка, барионы — из трех кварков, антибарионы — из трех антикварков. Выбирая различные спиновые состояния кварков и их относительные орбитальные моменты,

можно построить наблюдаемые адронные состояния с любыми значениями спина и четности. Поскольку кварки с разными квантовыми числами равноправны, каждому из них приписывается дробный барионный заряд  $B=1/3$  (у антикварков  $B=-1/3$ ). Тогда по формуле  $Q=I_3+Y/2$ , где  $Y=B+S+c+b+t$ , вычисляется заряд кварка  $Q$ , который также оказывается дробным (по отношению к абсолютному значению заряда электрона). Квантовые числа антикварков противоположны по знаку квантовым числам кварков, указанным в табл. 36.1 (кроме  $I$ ).

В табл. 36.2, 36.3 приводится кварковый состав наиболее распространенных мезонов и барионов, содержащих кварки трех сортов:  $u, d, s$ . Символом  $J^P$  обозначены спин и четность адрона (полный момент и четность системы кварков, образующих адрон);  $I, I_3$  — изотопические квантовые числа адронов;  $Y$  — их гиперзаряд. Адроны, указанные в табл. 36.2, 36.3, образуют мультиплеты, состоящие из восьми или десяти частиц, массы которых отличаются от средней массы частиц мультиплета на 10—15%. Исключение составляют аномально легкие пионы ( $\pi^\pm, \pi^0$ ). Наблюдаемое объединение близких по массам адронов в более сложные по сравнению с изотопическими мультиплеты свидетельствует о том, что в мире адронов осуществляется, хотя и приближенно, более высокая симметрия, чем изотопическая. Она получила название *унитарной симметрии*.

Унитарные мультиплеты (табл. 36.2) представляют собой состояния, преобразующиеся по неприводимым представлениям группы  $SU(3)$  [2, 3]. Базисным представлением этой группы являются трехкомпонентные спиноры. Кварки  $u, d, s$  как раз и отвечают состояниям, образующим базисное представление группы  $SU(3)$ . Включение в рассмотрение  $c$ -,  $b$ - и  $t$ -кварков приводит к расширению группы симметрии до  $SU(4)$ ,  $SU(5)$  и  $SU(6)$  соответственно. Экспериментальные данные о массах адронов, содержащих  $c$ -кварки, указывают на то, что симметрия  $SU(4)$  нарушена в мире адронов уже гораздо сильнее, чем  $SU(3)$ .  $SU(4)$  и более высокие

симметрии проявляются в существовании адронных мультиплетов, образующих частицы, сильно различающиеся по массам. Реализация в природе лишь таких адронных состояний, которые предсказываются кварковой моделью, — серьезный аргумент в пользу существования кварков как реальных физических объектов, а не математических символов, отражающих приближенную, сильно нарушенную симметрию в мире адронов. До настоящего времени сколько-нибудь убедительных прямых экспериментальных доказательств существования кварков в свободном состоянии нет. Однако кроме успешной классификации адронов по мультиплетам получены косвенные свидетельства существования внутри адронов кварков с предсказываемыми квантовыми числами. Перечислим лишь некоторые эксперименты такого рода. Это эксперименты по спектроскопии семейств  $J/\psi$ - и  $\Upsilon$ -мезонов, по глубоконеупругому взаимодействию заряженных лептонов и нейтрино с нуклонами, процессы  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны и другие исследования, которые успешно интерпретируются в рамках гипотезы о существовании внутри адрона кварков как его составных частей с эффективным размером, существенно меньшим размеров адронов. Сильное нарушение в адронном мире  $SU(4)$ -и более высоких симметрий связывается с заметным утяжелением кварков  $c, b$  и  $t$  по сравнению с  $u, d, s$  [2, 3].

Т а б л и ц а 36.1. Квантовые числа кварков

| Сорт кварка | $Q$  | $B$ | $I$ | $I_3$ | $S$ | $c$ | $b$ | $t$ | $Y$  |
|-------------|------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|------|
| $u$         | 2/3  | 1/3 | 1/2 | 1/2   | 0   | 0   | 0   | 0   | -1/3 |
| $d$         | -1/3 | 1/3 | 1/2 | -1/2  | 0   | 0   | 0   | 0   | 1/3  |
| $s$         | -1/3 | 1/3 | 0   | 0     | -1  | 0   | 0   | 0   | -2/3 |
| $c$         | 2/3  | 1/3 | 0   | 0     | 0   | 1   | 0   | 0   | 4/3  |
| $b$         | -1/3 | 1/3 | 0   | 0     | 0   | 0   | -1  | 0   | -2/3 |
| $t$ (?)     | 2/3  | 1/3 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 1   | 4/3  |

Т а б л и ц а 36.2. Кварковый состав адронных октетов

| $Y$ | $I$ | $I_3$ | Барионы<br>$J^P = 1/2^+$ | Кварковый состав | Мезоны<br>$J^P = 0^-$ | Кварковый состав                          | Мезоны<br>$J^P = 1^-$ | Кварковый состав                                    |
|-----|-----|-------|--------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| 1   | 1/2 | 1/2   | $p$                      | $uud$            | $K^+$                 | $u\bar{s}$                                | $K^{*+}$              | $u\bar{s}$                                          |
| 1   | 1/2 | -1/2  | $n$                      | $ddu$            | $K^0$                 | $d\bar{s}$                                | $K^{*0}$              | $d\bar{s}$                                          |
| 0   | 1   | 1     | $\Sigma^+$               | $uus$            | $\pi^+$               | $u\bar{d}$                                | $\rho^+$              | $u\bar{d}$                                          |
| 0   | 1   | 0     | $\Sigma^0$               | $uds$            | $\pi^0$               | $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$ | $\rho^0$              | $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$           |
| 0   | 1   | -1    | $\Sigma^-$               | $dds$            | $\pi^-$               | $d\bar{u}$                                | $\rho^-$              | $d\bar{u}$                                          |
| 0   | 0   | 0     | $\Lambda$                | $uds$            | $\eta$                | $u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$            | $\omega, \varphi$     | $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d}), s\bar{s}$ |
| -1  | 1/2 | 1/2   | $\Xi^0$                  | $uss$            | $\bar{K}^0$           | $\bar{d}s$                                | $\bar{K}^{*0}$        | $\bar{d}s$                                          |
| -1  | 1/2 | -1/2  | $\Xi^-$                  | $dss$            | $K^-$                 | $u\bar{s}$                                | $K^{*-}$              | $u\bar{s}$                                          |

П р и м е ч а н и е.  $\eta$ -Мезон является смесью состояний унитарного скаляра и изотопического скаляра из унитарного октета мезонов  $0^-$ .

Таблица 36.3. Кварковый состав барионного декуплета

| Барионы<br>$J^P = 3/2^+$ | $Y$ | $I$ | $I_3$ | Кварковый состав |
|--------------------------|-----|-----|-------|------------------|
| $\Delta^{++}$            | 1   | 3/2 | 3/2   | $uuu$            |
| $\Delta^+$               | 1   | 3/2 | 1/2   | $uud$            |
| $\Delta^0$               | 1   | 3/2 | -1/2  | $udd$            |
| $\Delta^-$               | 1   | 3/2 | -3/2  | $ddd$            |
| $\Sigma^{*+}$            | 0   | 1   | 1     | $uus$            |
| $\Sigma^{*0}$            | 0   | 1   | 0     | $uds$            |
| $\Sigma^{*-}$            | 0   | 1   | -1    | $dds$            |
| $\Xi^{*0}$               | -1  | 1/2 | 1/2   | $uss$            |
| $\Xi^{*-}$               | -1  | 1/2 | -1/2  | $dss$            |
| $\Omega^-$               | -2  | 0   | 0     | $sss$            |

### 36.5. ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ И СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Открытие в 1983 г. векторных  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозонов в предсказанной теорией области масс:  $m(W^\pm) \approx 80$  ГэВ,  $m(Z^0) \approx 90$  ГэВ укрепило доверие к теоретическим калибровочным схемам, объединяющим различные типы взаимодействий в единое взаимодействие. Теория электромагнитных взаимодействий с сохраняющимся электрическим зарядом может быть построена на основе локальной калибровочной симметрии  $U(1)$ . Это группа унитарных преобразований с одним параметром, зависящим от координат точки пространства Минковского, где осуществляется преобразование. Она является абелевой — различные  $U(1)$ -преобразования коммутируют между собой. Рассмотрение неабелевых групп калибровочных преобразований, в частности локальной калибровочной симметрии  $SU(2) \oplus U(1)$ , требующей введения четырех калибровочных безмассовых векторных полей, позволило построить единую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий. При этом первоначально безмассовые векторные калибровочные бозоны приобрели, за исключением фотона, массы за счет взаимодействий со скалярным полем, спонтанно нарушающим  $SU(2) \oplus U(1)$ -симметрию вакуумного состояния (механизм Хиггса) до электромагнитной калибровочной симметрии  $U_{em}(1)$ .

В основу калибровочной теории сильных взаимодействий [4] положена калибровочная симметрия  $SU(3)_c$ . Использование этой группы симметрии связано прежде всего с необходимостью обеспечить выполнение требований статистики Ферми — Дирака для грекварковых систем, образующих, например,  $\Delta^{++}$ - или  $\Omega^-$ -барионы в состояниях с проекцией спина  $I_3 \approx 3/2$ , при нулевых значениях кварковых относительных орбитальных моментов, характерных для основных состояний связанных систем. Простейший способ обеспечить антисимметрию указанных состояний барионов относительно перестановки любой пары кварков — приписать каждому кварку с заданным ароматом (ароматом часто называют сорт кварка —  $u, d, s$ ,  $c$  и т. д.) еще одно квантовое число, которое может принимать три различных значения. Это квантовое число получило название *цвет*. Антисимметризация волновых функций кварков по цветовым степеням свободы обеспечивает требования статистики Ферми — Дирака для барионных состояний со спином и четностью  $3/2^+$ .

Указанные три цветовых состояния образуют спинорный базис группы  $SU(3)_c$ . Предположение о строгой инвариантности сильных взаимодействий относительно цветовой калибровочной группы преобразований  $SU(3)_c$  приводит к практически однозначному постро-

ению теории сильных взаимодействий кварков, которые осуществляются за счет обмена безмассовыми векторными частицами — глюонами, обладающими восемью цветовыми степенями свободы. В таком подходе фигурирует единственный параметр теории — безразмерная константа сильного взаимодействия  $\alpha_s = g^2/\hbar c$ , где  $g$  — аналог электрического заряда, называемый *цветовым зарядом*.

Как и квантовая электродинамика (КЭД), теория взаимодействия цветных кварков и глюонов — квантовая хромодинамика (КХД) — оказывается перенормируемой, что считается несомненным теоретическим достижением. В отличие от фотона, который электронейтрален, глюоны обладают цветовыми зарядами и взаимодействуют друг с другом даже в отсутствие кварков. Это обстоятельство приводит к специфическому поведению перенормированной константы сильного взаимодействия  $\alpha_s(r)$  в зависимости от расстояния между взаимодействующими кварками. По существу величину  $\alpha_s(r)$  уже нельзя называть константой. Для нее придумано специальное название — бегущая константа сильного взаимодействия. В то время как в КЭД аналогичная величина  $\alpha(r)$  логарифмически растет при  $r \rightarrow 0$ , в КХД из-за указанного эффекта взаимодействия глюонов между собой при  $r \rightarrow 0$  бегущая константа сильного взаимодействия ведет себя как  $\alpha_s(r) \sim [\ln(r_0/r)]^{-1} \rightarrow 0$  ( $r_0$  — размер адрона). Этот эффект получил наименование *асимптотической свободы* сильных взаимодействий. Его существование позволяет проводить расчеты процессов сильного взаимодействия на малых расстояниях (при больших передаваемых импульсах) по теории возмущений. Более того, экстраполяция поведения  $\alpha_s(r)$  на большие расстояния  $r$  между взаимодействующими цветными кварками указывает на возможность записания кварков в адроне.

Этот эффект пока не доказан теоретически, так как при  $\alpha_s(r) \gg 1$  нельзя пользоваться теорией возмущений и необходимо развить методы расчета, применимые при больших значениях эффективной константы взаимодействия. Тем не менее обнаруженные экспериментально адроны являются бесцветными. Они — скаляры группы  $SU(3)_c$ . Гипотеза записания цветных кварков внутри адронов позволяет понять, почему наблюдаются только бесцветные адроны и почему кварки не существуют в свободном состоянии. Наконец, следует отметить, что вплоть до расстояний порядка  $10^{-16}$  см не обнаружено никакой структуры у электронов и мюонов [3]. Это дает основания рассматривать лептоны, наряду с кварками и калибровочными бозонами, как фундаментальные микрочастицы материи, которые определяют свойства и взаимодействия элементарных частиц, по крайней мере, на расстояниях, больших  $10^{-16}$  см.

### 36.6. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СТАБИЛЬНЫЕ ПО ОТНОШЕНИЮ К РАСПАДАМ ПО СИЛЬНОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ

Погрешности измерений, приведенные в табл. 36.4, представляют собой в большинстве случаев средние квадратические отклонения. Если приводятся результаты обработки различных экспериментальных данных и погрешности измерений распределены при этом не по нормальному закону, то истинная погрешность находится умножением вычисленной погрешности на множитель  $S$ , приведенный в табл. 36.4. В таблице  $C_n$  — зарядовая четность нейтральной частицы;  $\Gamma$  — полная ширина распада в энергетических единицах;  $p$  — наибольшее из возможных значений импульса одной из частиц — продукта распада в системе покоя распадающейся частицы;  $c$  — скорость света;  $h$  — адрон;  $\gamma_{R,L}$  — право- или левополяризованный фотон. Символ  $a \downarrow$  ( $a^+ \rightarrow CC$ ) означа-

Т а б л и ц а 36.4. Характеристики элементарных частиц, стабильных по отношению к распадам по сильному взаимодействию [5]

| Частица                     | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя, МэВ      | Среднее время жизни, с                                | Продукты распада                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Относительная вероятность                                                                                                                                                                     | $\rho$ ,<br>МэВ/с                                                                       |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Калибровочные бозоны</i> |                                  |                       |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                               |                                                                                         |
| $\gamma$                    | 0,1 (1 <sup>-</sup> ) —          | $< 3 \cdot 10^{-33}$  | Стабилен                                              | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —                                                                                                                                                                                             | —                                                                                       |
| $W^\pm$                     | $J = 1$                          | 80 800 (2700)         | $\Gamma < 7$ ГэВ                                      | $e\nu$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Обнаружен                                                                                                                                                                                     | 40 400                                                                                  |
| $Z$                         | $J = 1$                          | 92 900 (1600)         | $\Gamma < 8,5$ ГэВ                                    | $e^+e^-$<br>$\mu^+\mu^-$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | } Обнаружен                                                                                                                                                                                   | 46 450<br>46 450                                                                        |
| <i>Лептоны</i>              |                                  |                       |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                               |                                                                                         |
| $\nu_e$                     | $J = 1/2$                        | $< 4,6 \cdot 10^{-5}$ | Стабильно,<br>$\tau > 3 \cdot 10^8 m_{\nu_e}$ МэВ     | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —                                                                                                                                                                                             | —                                                                                       |
| $e$                         | $J = 1/2$                        | 0,5110034 (14)        | Стабилен,<br>$\tau > 2 \cdot 10^{22}$ лет             | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —                                                                                                                                                                                             | —                                                                                       |
| $\nu_\mu$                   | $J = 1/2$                        | 0 ( $< 0,50$ )        | Стабильно,<br>$\tau > 1,1 \cdot 10^5 m_{\nu_\mu}$ МэВ | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —                                                                                                                                                                                             | —                                                                                       |
| $\mu$                       | $J = 1/2$                        | 105,65932 (29)        | $2,19709 (5) \cdot 10^{-6}$                           | $\mu^- \rightarrow CC$<br>$e^- \bar{\nu} \nu$<br>$e^- \bar{\nu} \nu \gamma$<br>$e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$<br>$e^- \gamma$<br>$e^- e^+ e^-$<br>$e^- \gamma \gamma$<br>$e^- \bar{\nu} \nu e^+ e^-$                                                                                                                                                                                                             | 0,986 (4)<br>0,014 (4)<br>$< 0,05$<br>$< 1,7 \cdot 10^{-10}$<br>$< 1,9 \cdot 10^{-9}$<br>$< 8,4 \cdot 10^{-9}$<br>$2,2 (1,5) \cdot 10^{-5}$                                                   | 53<br>53<br>53<br>53<br>53<br>53<br>53                                                  |
| $\nu_\tau$                  | $J = 1/2$                        | $< 164$               | —                                                     | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | —                                                                                                                                                                                             | —                                                                                       |
| $\tau$                      | $J = 1/2$                        | 1784,2 (3,2)          | $3,4 (0,5) \cdot 10^{-13}$                            | $\tau^- \rightarrow CC$<br>$\mu^- \bar{\nu} \nu$<br>$e^- \bar{\nu} \nu$<br>$h^- +$ нейтральные частицы<br>$3h^\pm +$ нейтральные частицы<br>$5h^\pm +$ нейтральные частицы<br>$3h^\pm \nu$<br>$3h^\pm \nu (\geq 1\gamma)$<br>$\pi^- \nu$<br>$\rho^- \nu$<br>$K^- \nu$<br>$K^- +$ нейтральные частицы<br>$K^{*-} (892) \nu$<br>$K^{*-} (1430) \nu$<br>$\pi^- \rho^0 \nu$<br>$e + \mu^- +$ заряженные частицы | 0,185 (11)<br>0,165 (9)<br>0,481 (20)<br>0,170 (13)<br>$< 0,014$<br>0,05 (4)<br>0,12 (4)<br>0,103 (12)<br>0,221 (24)<br>0,013 (5)<br>Малá<br>0,017 (7)<br>$< 0,009$<br>0,054 (17)<br>$< 0,04$ | 889<br>892<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>887<br>726<br>824<br>—<br>669<br>323<br>718<br>— |

| Частица | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя, МэВ | Среднее время жизни, с | Продукты распада    | Относительная<br>вероятность | $\rho$ ,<br>МэВ/с |
|---------|----------------------------------|------------------|------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------|
|         |                                  |                  |                        | $\mu^- \gamma$      | $< 5,5 \cdot 10^{-4}$        | 889               |
|         |                                  |                  |                        | $e^- \gamma$        | $< 6,4 \cdot 10^{-4}$        | 892               |
|         |                                  |                  |                        | $\mu^- \mu^+ \mu^-$ | $< 4,9 \cdot 10^{-4}$        | 876               |
|         |                                  |                  |                        | $e^- \mu^+ \mu^-$   | $< 3,3 \cdot 10^{-4}$        | 886               |
|         |                                  |                  |                        | $\mu^- e^+ e^-$     | $< 4,4 \cdot 10^{-4}$        | 889               |
|         |                                  |                  |                        | $e^- e^+ e^-$       | $< 4,0 \cdot 10^{-4}$        | 892               |
|         |                                  |                  |                        | $\mu^- \pi^0$       | $< 8,2 \cdot 10^{-4}$        | 884               |
|         |                                  |                  |                        | $e^- \pi^0$         | $< 2,1 \cdot 10^{-3}$        | 887               |
|         |                                  |                  |                        | $\mu^- K^0$         | $< 1,0 \cdot 10^{-3}$        | 819               |
|         |                                  |                  |                        | $e^- K^0$           | $< 1,3 \cdot 10^{-3}$        | 823               |
|         |                                  |                  |                        | $\mu^- \rho^0$      | $< 4,4 \cdot 10^{-4}$        | 722               |
|         |                                  |                  |                        | $e^- \rho^0$        | $< 3,7 \cdot 10^{-4}$        | 726               |

## Нестранные мезоны

|           |               |                                                                  |                                                                                                                             |                                |                               |     |
|-----------|---------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----|
| $\pi^\pm$ | $1^- (0^-)$   | 139,5673 (7)<br>$m_{\pi^\pm} - m_{\mu^\pm} =$<br>$= 33,9080 (8)$ | $2,6030 (23) \cdot 10^{-8}$                                                                                                 | $\pi^+ (\pi^- \rightarrow CC)$ |                               |     |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\mu^+ \nu$                    | $\sim 1$                      | 30  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ \nu$                      | $1,232 (24) \cdot 10^{-4}$    | 70  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\mu^+ \nu \gamma$             | $1,24 (25) \cdot 10^{-4}$     | 30  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ \nu \gamma$               | $5,6 (7) \cdot 10^{-8}$       | 70  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ \nu \pi^0$                | $1,033 (34) \cdot 10^{-3}$    | 5   |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ \nu e^+ e^-$              | $< 5 \cdot 10^{-9}$           | 70  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\mu^+ \bar{\nu}_e$            | $< 1,5 \cdot 10^{-3}$         | 30  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\mu^+ \nu_e$                  | $< 8 \cdot 10^{-3}$           | 30  |
| $\pi^0$   | $1^- (0^-)^+$ | 134,9630 (38)<br>$m_{\pi^\pm} - m_{\pi^0} =$<br>$= 4,6043 (37)$  | $0,83 (6) \cdot 10^{-16}$<br>$S = 1,8$                                                                                      | $\gamma \gamma$                | $0,98802 (20)$                | 67  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\gamma e^+ e^-$               | $0,0198$                      | 67  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\gamma \gamma \gamma$         | $< 3,8 \cdot 10^{-7}$         | 67  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ e^- e^+ e^-$              | $3,24 \cdot 10^{-5}$          | 67  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\gamma \gamma \gamma \gamma$  | $< 4 \cdot 10^{-6}$           | 67  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ e^-$                      | $(1,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-7}$ | 67  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\nu \nu$                      | $< 2,4 \cdot 10^{-5}$         | 67  |
| $\eta$    | $0^+ (0^-)^+$ | 548,8 (6)<br>$S = 1,4$                                           | $\Gamma = 0,88 (12) \text{ кэВ}$<br>Нейтральные распады<br>$(70,9 \pm 0,7) \%$<br>Заряженные распады<br>$(29,1 \pm 0,7) \%$ | $\mu^+ e^- + \mu^- e^+$        | $< 7 \cdot 10^{-8}$           | 26  |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\gamma \gamma$                | $0,390 (8)$                   | 274 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $3\pi^0$                       | $0,318 (8), S=1,1$            | 180 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^0 \gamma \gamma$          | $0,10 (2)$                    | 258 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^+ \pi^- \pi^0$            | $0,237 (5)$                   | 175 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^+ \pi^- \gamma$           | $0,0491 (13)$                 | 236 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ e^- \gamma$               | $0,0050 (12)$                 | 274 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\mu^+ \mu^- \gamma$           | $3,1 (4) \cdot 10^{-4}$       | 253 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $e^+ e^-$                      | $< 3 \cdot 10^{-4}$           | 274 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\mu^+ \mu^-$                  | $6,5 (2,1) \cdot 10^{-6}$     | 253 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^+ \pi^- e^+ e^-$          | $0,0013 (13)$                 | 236 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^+ \pi^- \gamma \gamma$    | $< 0,0021$                    | 236 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^+ \pi^- \pi^0 \gamma$     | $< 0,0006$                    | 175 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^+ \pi^-$                  | $< 0,0015$                    | 236 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^0 e^+ e^-$                | $< 5 \cdot 10^{-5}$           | 258 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^0 \mu^+ \mu^-$            | $< 5 \cdot 10^{-6}$           | 211 |
|           |               |                                                                  |                                                                                                                             | $\pi^0 \mu^+ \mu^- \gamma$     | $< 3 \cdot 10^{-6}$           | 211 |

## Странные мезоны

|         |             |                                                                        |                                          |                            |                             |     |
|---------|-------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----|
| $K^\pm$ | $1/2 (0^-)$ | 493,667 (15)<br>$m_{K^\pm} - m_{K^0} =$<br>$= -4,01 (13)$<br>$S = 1,1$ | $1,2371 (26) \cdot 10^{-8}$<br>$S = 1,9$ | $K^+ (K^- \rightarrow CC)$ |                             |     |
|         |             |                                                                        |                                          | $\mu^+ \nu$                | $0,6351 (16)$               | 236 |
|         |             |                                                                        |                                          | $\pi^+ \pi^0$              | $0,2117 (15)$               | 205 |
|         |             |                                                                        |                                          | $\pi^+ \pi^+ \pi^-$        | $0,0559 (3), S=1,1$         | 125 |
|         |             |                                                                        |                                          | $\pi^+ \pi^0 \pi^0$        | $0,0173 (5), S=1,4$         | 133 |
|         |             |                                                                        |                                          | $\pi^0 \mu^+ \nu$          | $0,0318 (10),$<br>$S = 1,9$ | 215 |
|         |             |                                                                        |                                          | $\pi^0 e^+ \nu$            | $0,0482 (5), S=1,1$         | 228 |

| Частица          | Квантовые числа<br>$I^G (J^P) C_n$ | Масса покоя, МэВ         | Среднее время жизни, с       | Продукты распада              | Относительная<br>вероятность        | $\rho$ ,<br>МэВ/с |
|------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| $K^0, \bar{K}^0$ | $1/2 (0^-)$                        | 497,67 (13)<br>$S = 1,1$ | —                            | $\mu^+ \nu \gamma$            | $(5,8 \pm 3,5) \cdot 10^{-3}$       | 236               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^0 \pi^0 e^+ \nu$         | $(1,8^{+2,4}_{-0,6}) \cdot 10^{-5}$ | 207               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^- e^+ \nu$         | $(3,90 \pm 0,15) \cdot 10^{-5}$     | 203               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^+ e^- \bar{\nu}$   | $< 1,2 \cdot 10^{-8}$               | 203               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$       | $(1,4 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$       | 151               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^+ \mu^- \bar{\nu}$ | $< 3,0 \cdot 10^{-6}$               | 151               |
|                  |                                    |                          |                              | $e^+ \nu$                     | $(1,54 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$     | 247               |
|                  |                                    |                          |                              | $e^+ \nu \gamma_R$            | $(1,52 \pm 0,23) \cdot 10^{-5}$     | 247               |
|                  |                                    |                          |                              | $e^+ \nu \gamma_L$            | $< 1,6 \cdot 10^{-4}$               | 247               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^0 \gamma$          | $(2,75 \pm 0,16) \cdot 10^{-4}$     | 205               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$    | $(1,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$       | 125               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^0 \mu^+ \nu \gamma$      | $< 6 \cdot 10^{-5}$                 | 215               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^0 e^+ \nu \gamma$        | $(3,7 \pm 1,4) \cdot 10^{-4}$       | 228               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ e^+ e^-$               | $(2,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$       | 227               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^- e^+ e^+$               | $< 1 \cdot 10^{-8}$                 | 227               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \mu^+ \mu^-$           | $< 2,4 \cdot 10^{-6}$               | 172               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \gamma \gamma$         | $< 8 \cdot 10^{-6}$                 | 227               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \gamma \gamma \gamma$  | $< 1,0 \cdot 10^1$                  | 227               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \nu \bar{\nu}$         | $< 1,4 \cdot 10^{-7}$               | 227               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^\mp e^\pm \mu^\pm$       | $< 7 \cdot 10^{-9}$                 | 214               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ e^- \mu^+$             | $< 5 \cdot 10^{-9}$                 | 214               |
|                  |                                    |                          |                              | $e^+ \nu \nu \bar{\nu}$       | $< 6 \cdot 10^{-5}$                 | 247               |
|                  |                                    |                          |                              | $\mu^+ \nu \nu \bar{\nu}$     | $< 6 \cdot 10^{-6}$                 | 236               |
|                  |                                    |                          |                              | $\mu^+ \nu e^+ e^-$           | $(11 \pm 3) \cdot 10^{-7}$          | 236               |
|                  |                                    |                          |                              | $\mu^- \nu e^+ e^+$           | $< 2,0 \cdot 10^{-8}$               | 236               |
|                  |                                    |                          |                              | $e^+ \nu e^+ e^-$             | $(2^{+2}_{-1}) \cdot 10^{-7}$       | 247               |
|                  |                                    |                          |                              | $\mu^+ \nu_e$                 | $< 4 \cdot 10^{-3}$                 | 236               |
|                  |                                    |                          |                              | $\mu^+ \bar{\nu}_e$           | $< 3,3 \cdot 10^{-3}$               | 236               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^0 e^+ \bar{\nu}_e$       | $< 3 \cdot 10^{-3}$                 | 228               |
|                  |                                    |                          |                              | 50% $K_S$                     | —                                   | —                 |
|                  |                                    |                          |                              | 50% $K_L$                     | —                                   | —                 |
| $K_S^0$          | $1/2 (0^-)$                        | —                        | $0,8923 (22) \cdot 10^{-10}$ | $\pi^+ \pi^-$                 | $0,6861 (24),$<br>$S = 1,1$         | 206               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^0 \pi^0$                 | 0,3139                              | 209               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^- \gamma$          | $(1,85 \pm 0,10) \cdot 10^{-3}$     | 206               |
|                  |                                    |                          |                              | $\mu^+ \mu^-$                 | $< 3,2 \cdot 10^{-7}$               | 225               |
|                  |                                    |                          |                              | $e^+ e^-$                     | $< 3,4 \cdot 10^{-4}$               | 249               |
|                  |                                    |                          |                              | $\gamma \gamma$               | $< 4 \cdot 10^{-4}$                 | 249               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^+ \pi^- \pi^0$           | $< 8,5 \cdot 10^{-5}$               | 133               |
|                  |                                    |                          |                              | $\pi^0 \pi^0 \pi^0$           | $< 3,7 \cdot 10^{-5}$               | 135               |

| Частица | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя, МэВ                                                        | Среднее время жизни, с     | Продукты распада                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Относительная<br>вероятность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\rho$ ,<br>МэВ/с                                                                                                                      |
|---------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $K_L^0$ | $1/2 (0^-)$                      | $m_{K_L} - m_{K_S} =$<br>$= 3,521 (14) \times$<br>$\times 10^{-12}$ МэВ | $5,183 (40) \cdot 10^{-8}$ | $\pi^0 \pi^0 \pi^0$<br>$\pi^+ \pi^- \pi^0$<br>$\pi^\pm \mu^\mp \nu$<br>$\pi^\pm e^\mp \nu$<br>$\pi e \nu \gamma$<br>$\pi^+ \pi^-$<br>$\pi^0 \pi^0$<br>$\pi^+ \pi^- \gamma$<br>$\pi^0 \gamma \gamma$<br>$\gamma \gamma$<br>$e \mu$<br>$\mu^+ \mu^-$<br>$\mu^+ \mu^- \gamma$<br>$\pi^0 \mu^+ \mu^-$<br>$e^+ e^-$<br>$e^+ e^- \gamma$<br>$\pi^0 e^+ e^-$<br>$\pi^+ \pi^- e^+ e^-$<br>$\pi^0 \pi^\pm e^\mp \nu$<br>$(\pi \mu \text{ атом}) \nu$ | $(21,5 \pm 1,0) \%$ ,<br>$S = 1,7$<br>$(12,39 \pm 0,20) \%$ ,<br>$S = 1,3$<br>$(27,1 \pm 0,4) \%$ ,<br>$S = 1,4$<br>$(38,7 \pm 0,5) \%$ ,<br>$S = 1,5$<br>$(1,3 \pm 0,8) \%$<br>$(0,203 \pm 0,005) \%$ ,<br>$S = 1,1$<br>$(0,094 \pm 0,018) \%$ ,<br>$S = 1,5$<br>$(4,41 \pm 0,32) \cdot 10^{-5}$<br>$< 2,4 \cdot 10^{-4}$<br>$(4,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$<br>$< 6 \cdot 10^{-6}$<br>$(9,1 \pm 1,9) \cdot 10^{-9}$<br>$(2,8 \pm 2,8) \cdot 10^{-7}$<br>$< 1,2 \cdot 10^{-6}$<br>$< 2,0 \cdot 10^{-7}$<br>$(1,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$<br>$< 2,3 \cdot 10^{-6}$<br>$< 9 \cdot 10^{-6}$<br>$(6,2 \pm 2,0) \cdot 10^{-5}$<br>$(1,05 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}$ | 139<br>133<br>216<br>229<br>229<br>206<br>209<br>206<br>231<br>249<br>238<br>225<br>225<br>177<br>249<br>249<br>231<br>206<br>207<br>— |

## Очарованные нестранные мезоны

|                  |             |                                                          |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                       |
|------------------|-------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $D^\pm$          | $1/2 (0^-)$ | 1869,4 (6)<br>$m_{D^\pm} - m_{D^0} =$<br>$= 4,7 \pm 0,3$ | $(9,2^{+1,7}_{-1,2}) \cdot 10^{-13}$ | $D^\pm \downarrow (D^- \rightarrow CC)$<br>$e^\pm + \text{всё}$<br>$K^- + \text{всё}$<br>$\bar{K}^0 + K^0 + \text{всё}$<br>$K^+ + \text{всё}$<br>$\eta + \text{всё}$<br>$K^- \pi^+ \pi^+$<br>$K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$<br>$K^- \pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^-$<br>$\bar{K}^0 \pi^+$<br>$\bar{K}^0 \pi^+ \pi^0$<br>$\bar{K}^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$<br>$\bar{K}^0 K^+$<br>$K^+ K^- \pi^+$<br>$K^+ \pi^+ \pi^-$<br>$\pi^+ \pi^0$<br>$\pi^+ \pi^+ \pi^-$<br>$\bar{K}^{*0} \pi^+$<br>$\mu^+ \nu$<br>$D^0 \downarrow (\bar{D}^0 \rightarrow CC)$<br>$e^\pm + \text{всё}$ | $0,19^{+0,04}_{-0,03}$<br>$0,16 (4)$<br>$0,48 (15)$<br>$0,060 (33)$<br>$< 0,13$<br>$0,046 (11)$<br>$0,026^{+0,031}_{-0,010}$ ,<br>$S = 1,3$<br>$< 0,04$<br>$0,018 (5)$<br>$0,13 (8)$<br>$0,084 (35)$<br>$0,0045 (30)$<br>$< 0,006$<br>$< 0,0023$<br>$< 0,005$<br>$< 0,004$<br>$< 0,037$<br>$< 0,02$<br>$(5,3^{+2,9}_{-1,3}) \%$ | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>845<br>816<br>772<br>862<br>845<br>814<br>792<br>744<br>845<br>925<br>908<br>714<br>932<br>— |
| $D^0, \bar{D}^0$ | $1/2 (0^-)$ | 1864,7 (6)                                               | $(4,4^{+0,8}_{-0,6}) \cdot 10^{-13}$ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                       |



| Частица                                  | Квантовые числа<br>$I^G(J^P) C_n$ | Масса<br>покоя, МэВ | Среднее время жизни, с                                                                               | Продукты распада                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Относительная<br>вероятность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $P$ ,<br>МэВ/с                                                                                                                          |
|------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                          |                                   |                     | $\frac{\Gamma(D^0 \rightarrow \bar{D}^0 \rightarrow K^+\pi^-)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K\pi)} < 0,16$ | $K^- + \text{всё}$<br>$\bar{K}^0 + K^0 + \text{всё}$<br>$K^+ + \text{всё}$<br>$\eta + \text{всё}$<br>$K^-\pi^+$<br>$K^-\pi^+\pi^0$<br>$K^-\pi^+\pi^+\pi^-$<br>$K^-\pi^+\pi^0\pi^0$<br>$\bar{K}^0\pi^0$<br>$\bar{K}^0\pi^+\pi^-$<br>$\pi^+\pi^-$<br>$\pi^+\pi^-\pi^-\pi^-$<br>$K^+K^-$<br>$K^{*-}\pi^+$<br>$K^{*0}\pi^0$<br>$K^-\rho^+$<br>$\bar{K}^0\rho^0$<br>$\bar{K}^{*0}\rho^0$<br>$K^-\pi^+\rho^0$<br>$\bar{K}^{*0}\pi^+\pi^-$<br>$K-A_2^+$ | $(44 \pm 10) \%$ ,<br>$S = 1,3$<br>$(33 \pm 10) \%$<br>$(8 \pm 3) \%$<br>$< 13\%$<br>$(2,4 \pm 0,4) \%$<br>$(9,3 \pm 2,8) \%$<br>$(4,6 \pm 1,4) \%$ ,<br>$S = 1,2$<br>Обнаружен<br>$(2,2 \pm 1,1) \%$<br>$(4,2 \pm 0,8) \%$<br>$(7,9 \pm 3,8) \cdot 10^{-4}$<br>$< 1,0\%$<br>$(2,7 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$<br>$(3,4 \pm 1,4) \%$<br>$\begin{pmatrix} 1,4 & +2,3 \\ & -1,4 \end{pmatrix} \%$<br>$\begin{pmatrix} 7,2 & +3,0 \\ & -3,1 \end{pmatrix} \%$<br>$\begin{pmatrix} 0,1 & +0,6 \\ & -0,1 \end{pmatrix} \%$<br>$\begin{pmatrix} 0,7 & +0,8 \\ & -0,7 \end{pmatrix} \%$<br>$\begin{pmatrix} 3,9 & +1,3 \\ & -1,6 \end{pmatrix} \%$<br>$< 2,3\%$<br>$0,8\%$ | —<br>—<br>—<br>—<br>861<br>844<br>812<br>815<br>860<br>842<br>922<br>768<br>791<br>711<br>711<br>679<br>677<br>423<br>613<br>685<br>198 |
| <i>Очарованный странный мезон</i>        |                                   |                     |                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                         |
| $F^\pm$                                  | $0(0^-)$                          | 1971 (6)            | $(1,9 \begin{smallmatrix} +1,3 \\ -0,7 \end{smallmatrix}) \cdot 10^{-13}$                            | $F^\pm (F^- \rightarrow CC)$<br>$\varphi\pi^+$<br>$\left. \begin{matrix} \eta\pi^+ \\ \eta\pi^+\pi^+\pi^- \\ \eta'\pi^+\pi^+\pi^- \end{matrix} \right\}$<br>$\rho^+\varphi$                                                                                                                                                                                                                                                                      | Обнаружен<br>Возможно,<br>обнаружен                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 713<br>903<br>857<br>679<br>411                                                                                                         |
| <i>Прелестные мезоны</i>                 |                                   |                     |                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                         |
| $B^\pm$                                  | $1/2(0^-)$                        | $5270,8 \pm 3,0$    | —                                                                                                    | $B^\pm (B^- \rightarrow CC)$<br>$\bar{D}^0\pi^+$<br>$D^{*-}\pi^+\pi^+$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $(4,2 \pm 4,2) \%$<br>$(4,8 \pm 3,0) \%$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 2303<br>2243                                                                                                                            |
| $B^0, \bar{B}^0$                         | $1/2(0^-)$                        | $5274,2 \pm 2,8$    | —                                                                                                    | $B^0 (\bar{B}^0 \rightarrow CC)$<br>$\bar{D}^0\pi^+\pi^-$<br>$D^{*-}\pi^+$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $(13 \pm 9) \%$<br>$(2,6 \pm 1,9) \%$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2298<br>2253                                                                                                                            |
| $B^\pm, B^0, \bar{B}^0$ (без разделения) | —                                 | —                   | $(14 \pm 4) \cdot 10^{-13}$                                                                          | $e^\pm \nu + \text{адроны}$<br>$\mu^\pm \nu + \text{адроны}$<br>$D^0 + \text{всё}$<br>$K + \text{всё}$<br>$p + \text{всё}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | $(13 \pm 1,3) \%$<br>$(12,4 \pm 3,5) \%$<br>$(80 \pm 28) \%$<br>Обнаружен<br>$> 3,6 \%$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | —<br>—<br>—<br>—<br>—                                                                                                                   |

| Частица                                           | Квантовые числа<br>$I^G(J^P) C_n$ | Масса покоя, МэВ                                                                                 | Среднее время жизни, с                                                                                                       | Продукты распада                                                                                                                                                                                                   | Относительная<br>вероятность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\rho$ ,<br>МэВ/с                                                                      |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                   |                                   |                                                                                                  |                                                                                                                              | $\Delta + \text{всё}$<br>$e^+e^- + \text{всё}$<br>$\mu^+\mu^- + \text{всё}$                                                                                                                                        | $> 2,2\%$<br>$< 0,8\%$<br>$< 0,7\%$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
| <i>Нестранные барионы</i>                         |                                   |                                                                                                  |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                        |
| $p$                                               | $1/2 (1/2^+)$                     | $938,2796 \pm 0,0027$                                                                            | Стабилен, $\tau \geq 10^{32}$ лет                                                                                            | —                                                                                                                                                                                                                  | —                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | —                                                                                      |
| $n$                                               | $1/2 (1/2^+)$                     | $939,5731 \pm 0,0027$<br>$m_p - m_n =$<br>$= -1,293323 \pm$<br>$\pm 0,000016$                    | $898 \pm 16$                                                                                                                 | $p e^- \bar{\nu}$<br>$p \nu \bar{\nu}$                                                                                                                                                                             | 100%<br>$< 9 \cdot 10^{-24}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1,2<br>1,3                                                                             |
| <i>Барионы со странностью <math>S = -1</math></i> |                                   |                                                                                                  |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                        |
| $\Delta$                                          | $0 (1/2^+)$                       | $1115,60 \pm 0,05$<br>$S = 1,2$<br>$m_\Delta - m_{\Sigma^0} =$<br>$= -76,86 (8)$                 | $2,632 (20) \cdot 10^{-10}$<br>$S = 1,6$                                                                                     | $p\pi^-$<br>$n\pi^0$<br>$p e^- \bar{\nu}$<br>$p \mu^- \bar{\nu}$<br>$p\pi^- \gamma$<br>$p\pi^0$<br>$n\pi^+$<br>$p\gamma$<br>$n\pi^+ \gamma$<br>$\Delta e^+ \nu$<br>$n\mu^+ \nu$<br>$n e^+ \nu$<br>$p e^+ e^-$      | $(64,2 \pm 0,5) \%$<br>$(35,8 \pm 0,5) \%$<br>$(8,37 \pm 0,14) \cdot 10^{-4}$<br>$(1,57 \pm 0,35) \cdot 10^{-4}$<br>$(8,5 \pm 1,4) \cdot 10^{-4}$<br>$(51,64 \pm 0,30) \%$<br>$(48,36 \pm 0,30) \%$<br>$(1,20 \pm 0,13) \times$<br>$\times 10^{-3}, S = 1,2$<br>$(4,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$<br>$(2,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$<br>$< 3,0 \cdot 10^{-5}$<br>$< 5 \cdot 10^{-6}$<br>$< 7 \cdot 10^{-6}$ | 100<br>104<br>163<br>131<br>100<br>189<br>185<br>225<br>185<br>71<br>202<br>224<br>225 |
| $\Sigma^+$                                        | $1 (1/2^+)$                       | $1189,36 \pm 0,06$<br>$S = 1,8$<br>$m_{\Sigma^+} - m_{\Sigma^-} =$<br>$= -7,97 (7)$<br>$S = 1,3$ | $0,800 (4) \cdot 10^{-10}$<br>$\frac{\Gamma(\Sigma^+ \rightarrow l^+ n \nu)}{\Gamma(\Sigma^- \rightarrow l^- n \nu)} < 0,04$ | $n\pi^+$<br>$p\pi^0$<br>$n\pi^+$<br>$p\gamma$<br>$n\pi^+ \gamma$<br>$\Delta e^+ \nu$<br>$n\mu^+ \nu$<br>$n e^+ \nu$<br>$p e^+ e^-$                                                                                 | $(51,64 \pm 0,30) \%$<br>$(48,36 \pm 0,30) \%$<br>$(1,20 \pm 0,13) \times$<br>$\times 10^{-3}, S = 1,2$<br>$(4,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$<br>$(2,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$<br>$< 3,0 \cdot 10^{-5}$<br>$< 5 \cdot 10^{-6}$<br>$< 7 \cdot 10^{-6}$                                                                                                                                                      | 189<br>185<br>225<br>185<br>71<br>202<br>224<br>225                                    |
| $\Sigma^0$                                        | $1 (1/2^+)$                       | $1192,46 (8)$                                                                                    | $5,8 (1,3) \cdot 10^{-20}$                                                                                                   | $\Delta\gamma$<br>$\Delta e^+ e^-$<br>$\Delta\gamma\gamma$<br>$n\pi^-$<br>$n e^- \nu$<br>$n\mu^- \nu$<br>$\Delta e^- \nu$<br>$n\pi^- \gamma$                                                                       | 100%<br>$5,45 \cdot 10^{-3}$<br>$< 3\%$<br>100%<br>$(1,022 \pm 0,034) \times$<br>$\times 10^{-3}$<br>$(0,45 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$<br>$(5,74 \pm 0,27) \cdot 10^{-5}$<br>$(4,6 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$                                                                                                                                                                                              | 74<br>74<br>74<br>193<br>230<br>210<br>79<br>193                                       |
| $\Sigma^-$                                        | $1 (1/2^+)$                       | $1197,34 (5)$<br>$m_{\Sigma^0} - m_{\Sigma^-} =$<br>$= -4,88$                                    | $1,482 (11) \cdot 10^{-10}$<br>$S = 1,3$                                                                                     | $n\pi^-$<br>$n e^- \nu$<br>$n\mu^- \nu$<br>$\Delta e^- \nu$<br>$n\pi^- \gamma$                                                                                                                                     | $(1,022 \pm 0,034) \times$<br>$\times 10^{-3}$<br>$(0,45 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$<br>$(5,74 \pm 0,27) \cdot 10^{-5}$<br>$(4,6 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$                                                                                                                                                                                                                                                 | 193<br>230<br>210<br>79<br>193                                                         |
| <i>Барионы со странностью <math>S = -2</math></i> |                                   |                                                                                                  |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                        |
| $\Xi^0$                                           | $1/2 (1/2^+)$                     | $1314,9 (6)$<br>$m_{\Xi^0} - m_{\Xi^-} =$<br>$= -6,4 (6)$                                        | $2,90 (10) \cdot 10^{-10}$                                                                                                   | $\Delta\pi^0$<br>$\Delta\gamma$<br>$\Sigma^0\gamma$<br>$p\pi^-$<br>$p e^- \bar{\nu}$<br>$\Sigma^+ e^- \bar{\nu}$<br>$\Sigma^- e^+ \nu$<br>$\Sigma^+ \mu^- \bar{\nu}$<br>$\Sigma^- \mu^+ \nu$<br>$p\mu^- \bar{\nu}$ | 100%<br>$(0,5 \pm 0,5) \%$<br>$< 7\%$<br>$< 3,6 \cdot 10^{-5}$<br>$< 1,3 \cdot 10^{-3}$<br>$< 1,1 \cdot 10^{-3}$<br>$< 0,9 \cdot 10^{-3}$<br>$< 1,1 \cdot 10^{-3}$<br>$< 0,9 \cdot 10^{-3}$<br>$< 1,3 \cdot 10^{-3}$                                                                                                                                                                                  | 135<br>184<br>117<br>299<br>323<br>120<br>112<br>65<br>49<br>309                       |

| Частица | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя, МэВ | Среднее время жизни, с     | Продукты распада    | Относительная вероятность     | $\rho$ ,<br>МэВ/с |
|---------|----------------------------------|------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------|
| $\Xi^-$ | $1/2(1/2^+)$                     | 1321,32 (13)     | $1,641(16) \cdot 10^{-10}$ | $\Delta\pi^-$       | 100%                          | 139               |
|         |                                  |                  |                            | $\Delta e^- \nu$    | $(5,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$ | 190               |
|         |                                  |                  |                            | $\Sigma^0 e^- \nu$  | $(8,7 \pm 1,7) \cdot 10^{-5}$ | 123               |
|         |                                  |                  |                            | $\Delta\mu^- \nu$   | $(3,5 \pm 3,5) \cdot 10^{-4}$ | 163               |
|         |                                  |                  |                            | $\Sigma^0\mu^- \nu$ | $< 8 \cdot 10^{-4}$           | 70                |
|         |                                  |                  |                            | $n\pi^-$            | $< 1,9 \cdot 10^{-5}$         | 303               |
|         |                                  |                  |                            | $ne^- \nu$          | $< 3,2 \cdot 10^{-3}$         | 327               |
|         |                                  |                  |                            | $n\mu^- \nu$        | $< 1,5\%$                     | 313               |
|         |                                  |                  |                            | $\Sigma^- \gamma$   | $< 1,2 \cdot 10^{-3}$         | 118               |
|         |                                  |                  |                            | $p\pi^- \pi^-$      | $< 4 \cdot 10^{-4}$           | 223               |
|         |                                  |                  |                            | $p\pi^- e^- \nu$    | $< 4 \cdot 10^{-4}$           | 304               |
|         |                                  |                  |                            | $p\pi^- \mu^- \nu$  | $< 4 \cdot 10^{-4}$           | 200               |
|         |                                  |                  |                            | $\Xi^0 e^- \nu$     | $< 2,3 \cdot 10^{-3}$         | 6                 |

Барион со странностью  $S = -3$ 

|            |            |              |                            |                     |                        |     |
|------------|------------|--------------|----------------------------|---------------------|------------------------|-----|
| $\Omega^-$ | $0(3/2^+)$ | 1672,45 (32) | $0,819(27) \cdot 10^{-10}$ | $\Delta K^-$        | $(68,6 \pm 1,3) \%$    | 211 |
|            |            |              |                            | $\Xi^0 \pi^-$       | $(23,4 \pm 1,3) \%$    | 294 |
|            |            |              |                            | $\Xi^- \pi^0$       | $(8,0 \pm 0,8) \%$     | 290 |
|            |            |              |                            | $\Xi^0 e^- \nu$     | $\sim 1\%$             | 319 |
|            |            |              |                            | $\Xi^0(1530) \pi^-$ | $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ | —   |
|            |            |              |                            | $\Delta\pi^-$       | $< 1,3 \cdot 10^{-3}$  | 449 |
|            |            |              |                            | $\Xi^- \gamma$      | $< 3,1 \cdot 10^{-3}$  | 314 |

## Нестранный очарованный барион

|               |            |                           |                                                                           |                                     |                      |     |
|---------------|------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----|
| $\Lambda_c^+$ | $0(1/2^+)$ | 2282,2 (3,1)<br>$S = 1,8$ | $(2,3 \begin{smallmatrix} +1,0 \\ -0,6 \end{smallmatrix}) \cdot 10^{-18}$ | $pK^- \pi^+$                        | $(2,2 \pm 1,0) \%$   | 820 |
|               |            |                           |                                                                           | $p\bar{K}^0$                        | $(1,1 \pm 0,7) \%$   | 870 |
|               |            |                           |                                                                           | $p\bar{K}^0 \pi^+ \pi^-$            | $< 4\%$              | 751 |
|               |            |                           |                                                                           | $\Delta\pi^+$                       | $(0,6 \pm 0,5) \%$   | 861 |
|               |            |                           |                                                                           | $\Delta\pi^+ \pi^+ \pi^-$           | $< 3,1\%$            | 804 |
|               |            |                           |                                                                           | $\Sigma^0 \pi^+$                    | Обнаружен            | 822 |
|               |            |                           |                                                                           | $pK^{*0}$                           | $(0,48 \pm 0,30) \%$ | 681 |
|               |            |                           |                                                                           | $\Delta^{++} K^-$                   | $(0,45 \pm 0,27) \%$ | 706 |
|               |            |                           |                                                                           | $pK^{*-} \pi^+$                     | Обнаружен            | 575 |
|               |            |                           |                                                                           | $e^+ \rightarrow \text{всё}$        | $(4,5 \pm 1,7) \%$   | —   |
|               |            |                           |                                                                           | $\mu e^+ \rightarrow \text{всё}$    | $(1,8 \pm 0,9) \%$   | —   |
|               |            |                           |                                                                           | $\Delta e^+ \rightarrow \text{всё}$ | $(1,1 \pm 0,8) \%$   | —   |
|               |            |                           |                                                                           | $\Delta \rightarrow \text{всё}$     | $(33 \pm 29) \%$     | —   |

Таблица 36.5. Характеристики мезонных резонансов [5]

| Частица                  | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя<br>$M$ , МэВ | Полная ширина<br>$\Gamma$ , МэВ | Продукты распада                                                                                                                                   | Относительная вероятность, %                                                                                                                                                                                       | $P$ ,<br>МэВ/c                                                   |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <i>Нестранные мезоны</i> |                                  |                          |                                 |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                    |                                                                  |
| $\rho(770)$              | $1^+(1^-)-$                      | 769 (3)<br>для $\rho^0$  | 154 (5)<br>для $\rho^0$         | $\pi\pi$<br>$\pi\gamma$<br>$\mu^+\mu^-$<br>$e^+e^-$<br>$\eta\gamma$                                                                                | $\sim 100$<br>$0,046 \pm 0,005$<br>$0,0067 \pm 0,0012$<br>$0,0046 \pm 0,0002$<br>Обнаружен                                                                                                                         | 358<br>372<br>370<br>384<br>189                                  |
| $\omega(783)$            | $0^-(1^-)-$                      | 782,6 (2)<br>$S = 1,1$   | 9,9 (3)                         | $\pi^+\pi^-\pi^0$<br>$\pi^0\gamma$<br>$\pi^+\pi^-$<br>$\pi^0\mu^+\mu^-$<br>$e^+e^-$                                                                | $89,9 \pm 0,5$<br>$8,7 \pm 0,5$<br>$1,4 \pm 0,2$<br>$0,010 \pm 0,002$<br>$0,0067 \pm 0,0004$ ,<br>$S = 1,2$                                                                                                        | 327<br>380<br>366<br>349<br>391                                  |
| $\eta'(958)$             | $0^+(0^-)+$                      | 957,57 (25)              | 0,29 (5)                        | $\eta\gamma$<br>$\eta\pi\pi$<br>$\rho^0\gamma$<br>$\omega\gamma$<br>$\Upsilon\Upsilon$<br>$\mu^+\mu^-\Upsilon$                                     | Обнаружен<br>$65,3 \pm 1,6$<br>$30,0 \pm 1,6$<br>$2,8 \pm 0,5$<br>$1,9 \pm 0,2$<br>$0,009 \pm 0,002$                                                                                                               | 199<br>231<br>170<br>159<br>479<br>467                           |
| $S(975)$<br>или<br>$S^*$ | $0^+(0^+)+$                      | 975 (4)<br>$S = 1,4$     | 33 (6)                          | $\pi\pi$<br>$K\bar{K}$                                                                                                                             | $78 \pm 3$<br>$22 \pm 3$                                                                                                                                                                                           | 467<br>—                                                         |
| $\delta(980)$            | $1^-(0^+)+$                      | 983 (2)                  | 54 (7)                          | $\eta\pi$<br>$K\bar{K}$<br>$K^+K^-$<br>$K_L K_S$<br>$\pi^+\pi^-\pi^0$<br>$\eta\gamma$<br>$\pi^0\gamma$<br>$e^+e^-$<br>$\mu^+\mu^-$<br>$\pi^+\pi^-$ | } Обнаружен<br>$49,3 \pm 1,0$ , $S = 1,3$<br>$34,7 \pm 1,0$ , $S = 1,3$<br>$14,8 \pm 0,7$ , $S = 1,2$<br>$1,2 \pm 0,2$ , $S = 1,4$<br>$0,14 \pm 0,05$<br>$0,031 \pm 0,001$<br>$0,025 \pm 0,003$<br>$0,02 \pm 0,01$ | 320<br>—<br>127<br>110<br>462<br>362<br>501<br>510<br>499<br>490 |
| $H(1190)$                | $0^-(1^+)-$                      | 1190 (60)                | 320 (50)                        | $\rho\pi$                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                    | 327                                                              |
| $B(1235)$                | $1^+(1^+)-$                      | 1234 (10)                | 150 (10)                        | $\omega\pi$                                                                                                                                        | »                                                                                                                                                                                                                  | 350                                                              |
| $f(1270)$                | $0^+(2^+)+$                      | 1274 (5)                 | 178 (20)                        | $\pi\pi$<br>$2\pi^+2\pi^-$<br>$K\bar{K}$<br>$\Upsilon\Upsilon$<br>$\pi^+\pi^-\pi^0$                                                                | $84,3 \pm 1,2$<br>$2,9 \pm 0,4$ , $S = 1,2$<br>$2,9 \pm 0,2$<br>$0,0015 \pm 0,0002$<br>Обнаружен                                                                                                                   | 622<br>559<br>398<br>637<br>562                                  |
| $A(1270)$<br>или $A_1$   | $1^-(1^+)+$                      | 1275 (30)                | 315 (45)                        | $\rho\pi$                                                                                                                                          | Доминирует                                                                                                                                                                                                         | 389                                                              |
| $D(1285)$                | $0^+(1^+)+$                      | 1283 (5)                 | 26 (5)                          | $\pi(\pi\pi)_{S\text{-волна}}$<br>$K\bar{K}\pi$<br>$\eta\pi\pi$<br>$4\pi$ (вероятно, $\rho\pi\pi$ )<br>$\bar{\Xi}\pi$                              | $< 0,7$<br>$11 \pm 3$<br>$49 \pm 6$<br>$40 \pm 7$<br>$36 \pm 7$                                                                                                                                                    | 599<br>302<br>482<br>564<br>236                                  |
| $\varepsilon(1300)$      | $0^+(0^+)+$                      | $\sim 1300$              | 200—600                         | $\pi\pi$<br>$K\bar{K}$<br>$\eta\eta$                                                                                                               | $\sim 90$<br>$\sim 10$<br>Возможно, обнаружен                                                                                                                                                                      | 635<br>418<br>348                                                |
| $\pi(1300)$              | $1^-(0^-)+$                      | $1300 \pm 100$           | 200—600                         | $\pi(\pi\pi)_{S\text{-волна}}$<br>$\rho\pi$                                                                                                        | } Обнаружен                                                                                                                                                                                                        | 612<br>407                                                       |
| $A_2(1320)$              | $1^-(2^+)+$                      | 1318 (5)                 | 110 (5)                         | $\rho\pi$<br>$\eta\pi$<br>$\omega\pi\pi$<br>$K\bar{K}$                                                                                             | $70,1 \pm 2,2$<br>$14,5 \pm 1,2$<br>$10,6 \pm 2,5$<br>$4,9 \pm 0,8$                                                                                                                                                | 419<br>534<br>361<br>434                                         |

| Частица                            | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя<br>$M$ , МэВ | Полная ширина<br>$\Gamma$ , МэВ | Продукты распада                                                                                                                                     | Относительная<br>вероятность, %                                                                               | $P$ ,<br>МэВ/c                                |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $E$ (1420)                         | $0^+(1^+) +$                     | 1418 (10)                | 52 (10)                         | $\eta'\pi$<br>$\pi\eta$<br>$\eta\eta$<br>$K\bar{K}\pi$ (включая $K^*\bar{K} +$<br>$+ K\bar{K}^*$ )<br>$\eta\pi\pi$<br>$\delta\pi$                    | $< 2$<br>$0,27 \pm 0,06$<br>$0,0007 \pm 0,0002$<br>Обнаружен                                                  | 286<br>652<br>659<br>423                      |
| $\epsilon$ (1440)                  | $0^+(0^-) +$                     | 1440 (10)                | 76 (10)                         | $K\bar{K}\pi$ (включая $K^*\bar{K} +$<br>$+ K\bar{K}^*$ )<br>$\eta\pi\pi$<br>$\delta\pi$                                                             | Возможно, обнаружен<br>Обнаружен                                                                              | 565<br>348<br>441                             |
| $f'$ (1525)                        | $0^+(2^+) +$                     | 1525 (5)                 | 70 (10)                         | $K\bar{K}$<br>$\pi\pi$                                                                                                                               | Доминирует<br>Возможно, обнаружен                                                                             | 578<br>750                                    |
| $\rho$ (1600)<br>или $\rho'$       | $1^+(1^-) -$                     | 1590 (20)                | $260 \pm 100$                   | $\eta\eta$<br>$4\pi$ (включая $\rho\pi^+\pi^-$ ,<br>$A_1\pi$ )<br>$\pi\pi$<br>$K^*\bar{K} + \bar{K}^*K$<br>$\eta\pi\pi$<br>$\bar{K}K$<br>$e^+e^-$    | $0,0011 \pm 0,0002$<br>$60 \pm 7$<br>$23 \pm 7$<br>$9 \pm 2$<br>$7 \pm 2$<br>$1 \pm 0,5$<br>$0,003 \pm 0,001$ | 763<br>733<br>783<br>377<br>669<br>623<br>795 |
| $\omega$ (1670)                    | $0^-(3^-) -$                     | 1668 (5)                 | $166$ (15)<br>$S = 1,1$         | $3\pi$<br>$\rho\pi$<br>$5\pi$<br>$\omega\pi\pi$ (вероятно, $B\pi$ )                                                                                  | Обнаружен                                                                                                     | 806<br>648<br>740<br>616                      |
| $A$ (1680)<br>или $A_3$            | $1^-(2^-) +$                     | 1680 (30)                | 250 (50)                        | $f\pi$<br>$\rho\pi$<br>$\pi(\pi\pi)_{S\text{-волна}}$<br>$K^*\bar{K} + \bar{K}^*K$                                                                   | $53 \pm 5$<br>$34 \pm 6$<br>$9 \pm 5$<br>$4 \pm 1,4$                                                          | 336<br>656<br>813<br>459                      |
| $\varphi$ (1680)<br>или $\varphi'$ | $0^-(1^-) -$                     | 1685 (10)                | 150 (30)                        | $K^*\bar{K} + \bar{K}^*K$<br>$\omega\pi\pi$<br>$K\bar{K}$<br>$e^+e^-$<br>$\pi^+\pi^-\pi^0$                                                           | Доминирует<br>Обнаружен<br>Возможно, обнаружен                                                                | 466<br>624<br>683<br>842<br>814               |
| $g$ (1690)                         | $1^+(3^-) -$                     | 1691 (5)                 | 200 (20)                        | $2\pi$<br>$4\pi$ (включая $\pi\pi\rho$ , $\rho\rho$ ,<br>$A_2\pi$ , $\omega\pi$ )<br>$K\bar{K}\pi$ (включая $K^*\bar{K} + \bar{K}^*$ )<br>$K\bar{K}$ | $23,8 \pm 1,3$<br>$70,9 \pm 1,9$<br>$3,8 \pm 1,2$<br>$1,5 \pm 0,3$                                            | 834<br>787<br>625<br>686                      |
| $\theta$ (1690)                    | $0^+(2^+) \pm$                   | 1690 (30)                | 180 (50)                        | $\eta\eta$<br>$K\bar{K}$                                                                                                                             | Обнаружен                                                                                                     | 643<br>683                                    |
| $\varphi$ (1850)                   | $0^-(3^-) -$                     | 1853 (10)                | $96 \pm 32$                     | $K\bar{K}$<br>$K^*\bar{K} + \bar{K}^*K$                                                                                                              | Обнаружен                                                                                                     | 784<br>601                                    |
| $h$ (2030)                         | $0^+(4^+) +$                     | 2027 (12)                | 220 (30)                        | $\pi\pi$<br>$K\bar{K}$                                                                                                                               | $17 \pm 2$<br>$0,7^{+0,4}_{-0,2}$                                                                             | 1004<br>883                                   |
| $\eta_c$ (2980)                    | $0^+(0^-) \pm$                   | 2981 (6)                 | $< 20$                          | $\eta\pi^+\pi^-$<br>$2(\pi^+\pi^-)$<br>$K^+K^-\pi^+\pi^-$<br>$\rho\rho$                                                                              | Обнаружен                                                                                                     | 1426<br>1458<br>1343<br>1158                  |

| Частица                             | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя<br>$M$ , МэВ | Полная ширина<br>$\Gamma$ , МэВ | Продукты распада                               | Относительная<br>вероятность, %              | $\rho$ ,<br>МэВ/с |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------|
| $J/\psi$ (3100)                     | $0^-(1^-)---$                    | 3096,9 (1)               | 0,063 (9)                       | $e^+e^-$<br>$\mu^+\mu^-$<br>Адроны + излучение | $7,4 \pm 1,2$<br>$7,4 \pm 1,2$<br>$85 \pm 2$ | 1548<br>1545<br>— |
| <i>Распады в стабильные адроны</i>  |                                  |                          |                                 |                                                |                                              |                   |
|                                     |                                  |                          |                                 | $2(\pi^+\pi^-)\pi^0$                           | $3,7 \pm 0,5$                                | 1496              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $3(\pi^+\pi^-)\pi^0$                           | $2,9 \pm 0,7$                                | 1433              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\pi^+\pi^-\pi^0 K^+K^-$                       | $1,2 \pm 0,3$                                | 1368              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $4(\pi^+\pi^-)\pi^0$                           | $0,9 \pm 0,3$                                | 1345              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\pi^+\pi^-K^+K^-$                             | $0,72 \pm 0,23$                              | 1407              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\overline{p}p\pi^+\pi^-$                      | $0,53 \pm 0,06$                              | 1107              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $2(\pi^+\pi^-)$                                | $0,4 \pm 0,1$                                | 1517              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $3(\pi^+\pi^-)$                                | $0,4 \pm 0,2$                                | 1466              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $n\overline{n}\pi^+\pi^-$                      | $0,38 \pm 0,36$                              | 1106              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\Xi\overline{\Xi}$                            | $0,32 \pm 0,08$                              | 818               |
|                                     |                                  |                          |                                 | $2(\pi^+\pi^-)K^+K^-$                          | $0,31 \pm 0,13$                              | 1320              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $K_S^0 K^\pm \pi^\mp$                          | $0,26 \pm 0,07$                              | 1440              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\Sigma^+\overline{\Sigma}^-$                  | $0,24 \pm 0,26$                              | 988               |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\overline{p}p\eta$                            | $0,23 \pm 0,04$                              | 948               |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\overline{p}p$                                | $0,22 \pm 0,02$                              | 1232              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\overline{p}n\pi^-$ или $\overline{p}n\pi^+$  | $0,21 \pm 0,02$                              | 1174              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $n\overline{n}$                                | $0,18 \pm 0,09$                              | 1231              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\overline{p}p\pi^+\pi^-\pi^0$                 | $0,16 \pm 0,06$                              | 1033              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\Sigma^0\overline{\Sigma}^0$                  | $0,13 \pm 0,04$                              | 988               |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\Delta\overline{\Delta}$                      | $0,11 \pm 0,02$                              | 1074              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\overline{p}p\pi^0$                           | $0,11 \pm 0,01$                              | 1176              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $2(K^+K^-)$                                    | $0,07 \pm 0,03$                              | 1131              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $K^+K^-$                                       | $0,022 \pm 0,008$                            | 1468              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\pi^+\pi^-$                                   | $0,011 \pm 0,005$                            | 1542              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\Delta\overline{\Sigma}$                      | $< 0,015$                                    | 1032              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $K_S^0 K_L^0$                                  | $< 0,009$                                    | 1466              |
| <i>Распады в адронные резонансы</i> |                                  |                          |                                 |                                                |                                              |                   |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\rho\pi$                                      | $1,22 \pm 0,12$                              | 1449              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\omega 2\pi^+ 2\pi^-$                         | $0,85 \pm 0,34$                              | 1392              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\rho A_2$                                     | $0,84 \pm 0,45$                              | 1126              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\omega\pi\pi$                                 | $0,68 \pm 0,19$                              | 1435              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $K^{*0}(892) K^{*0}(1430) +$<br>$+ c. c.$      | $0,67 \pm 0,26$                              | 1009              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $K^\pm K^{* \mp}(892)$                         | $0,34 \pm 0,05$                              | 1373              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $B^\pm(1235) \pi^\mp$                          | $0,29 \pm 0,07$                              | 1298              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $K^0 \overline{K}^{*0}(892) \pm c. c.$         | $0,27 \pm 0,06$                              | 1370              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\omega f$                                     | $0,23 \pm 0,08, S=1,2$                       | 1143              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\varphi\pi^+\pi^-$                            | $0,21 \pm 0,09$                              | 1365              |
|                                     |                                  |                          |                                 | $\eta' p\overline{p}$                          | $0,18 \pm 0,08$                              | 596               |

| Частица              | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя<br>$M$ , МэВ | Полная ширина<br>$\Gamma$ , МэВ | Продукты распада                                     | Относительная<br>вероятность, % | $p$ ,<br>МэВ/c |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------|
|                      |                                  |                          |                                 | $\varphi K\bar{K}$                                   | $0,18 \pm 0,08$                 | 1176           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\omega p\bar{p}$                                    | $0,16 \pm 0,03$                 | 768            |
|                      |                                  |                          |                                 | $\omega K\bar{K}$                                    | $0,16 \pm 0,10$                 | 1265           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\varphi\eta$                                        | $0,10 \pm 0,06$                 | 1320           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\varphi f' (1525)$                                  | $0,037 \pm 0,013$               | 871            |
|                      |                                  |                          |                                 | $\varphi S (975)$                                    | $0,026 \pm 0,006$               | 1184           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\pi^\pm A_2^\mp$                                    | $< 0,43$                        | 1263           |
|                      |                                  |                          |                                 | $K^{*0} (1430) \bar{K}^{*0} (1430)$                  | $< 0,29$                        | 606            |
|                      |                                  |                          |                                 | $K^0 \bar{K}^{*0} (1430) + c. c.$                    | $< 0,2$                         | 1158           |
|                      |                                  |                          |                                 | $K^\pm K^{*\mp} (1430)$                              | $< 0,2$                         | 1159           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\varphi 2\pi^+ 2\pi^-$                              | $< 0,15$                        | 1318           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\varphi \eta'$                                      | $< 0,13$                        | 1192           |
|                      |                                  |                          |                                 | $K^{*0} (892) \bar{K}^{*0} (892)$                    | $< 0,05$                        | 1261           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\varphi f$                                          | $< 0,037$                       | 1037           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\omega f' (1525)$                                   | $< 0,016$                       | 1003           |
| Радиационные распады |                                  |                          |                                 |                                                      |                                 |                |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma 2 (\pi^+ \pi^-)$                             | $0,49 \pm 0,17$                 | 1517           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma p\bar{p}$                                    | Обнаружен                       | 1344           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma^* (1440) \rightarrow \gamma K\bar{K}\pi$     | $0,42 \pm 0,12$                 | 1214           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma \eta'$                                       | $0,36 \pm 0,05$                 | 1400           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma f$                                           | $0,15 \pm 0,04$                 | 1286           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma \eta$                                        | $0,086 \pm 0,009$               | 1500           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma \pi^0$                                       | $0,007 \pm 0,005$               | 1546           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma \eta_c (2980)$                               | } Обнаружен                     | 114            |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma \theta (1690)$                               |                                 | 1087           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma \eta \pi \pi$                                |                                 | 1487           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma D (1285)$                                    | $< 0,6$                         | 1283           |
|                      |                                  |                          |                                 | $2\gamma$                                            | $\leq 0,05$                     | 1548           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma f' (1525)$                                   | $< 0,03$                        | 1173           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma p\bar{p}$                                    | $< 0,01$                        | 1232           |
|                      |                                  |                          |                                 | $3\gamma$                                            | $< 0,006$                       | 1548           |
| $\chi (3415)$        | $0^+ (0^+) +$                    | 3415 (1)                 | —                               | $2 (\pi^+ \pi^-)$ (включая $\pi\pi\rho$ )            | $4,3 \pm 0,9$                   | 1679           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\pi^+ \pi^- K^+ K^-$<br>(включая $\pi K\bar{K}^*$ ) | $3,4 \pm 0,9$                   | 1580           |
|                      |                                  |                          |                                 | $3 (\pi^+ \pi^-)$                                    | $1,7 \pm 0,6$                   | 1633           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\pi^+ \pi^-$                                        | $0,9 \pm 0,2$                   | 1702           |
|                      |                                  |                          |                                 | $\gamma J/\psi (3100)$                               | $0,8 \pm 0,3$                   | 303            |
|                      |                                  |                          |                                 | $K^+ K^-$                                            | $0,8 \pm 0,2$                   | 1635           |
|                      |                                  |                          |                                 | $p\bar{p} \pi^+ \pi^-$                               | $0,6 \pm 0,2$                   | 1320           |
| $\chi (3510)$        | $0^+ (1^+) +$                    | 3510,0 (6)               | —                               | $\gamma (J/\psi) (3100)$                             | $2,8 \pm 3$                     | 389            |
|                      |                                  |                          |                                 | $3 (\pi^+ \pi^-)$                                    | $2,4 \pm 0,9$                   | 1683           |
|                      |                                  |                          |                                 | $2 (\pi^+ \pi^-)$ (включая $\pi\pi\rho$ )            | $1,8 \pm 0,5$                   | 1727           |

Примечание. с. с. — зарядово-сопряженная пара частиц; с. с. =  $\bar{K}^0 K^{*0} (1430)$ .

| Частица       | Квантовые числа<br>$J^G(J^P) C_n$ | Масса покоя,<br>$M$ , МэВ                                                     | Полная ширина<br>$\Gamma$ , МэВ | Продукты распада                                  | Относительная<br>вероятность, % | $\rho$ ,<br>МэВ/с |
|---------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| $\chi$ (3555) | $0^+ (2^+) +$                     | 3555,8 (6)                                                                    | —                               | $\pi^+\pi^-K^+K^-$<br>(включая $\pi K\bar{K}^*$ ) | $1,0 \pm 0,4$                   | 1632              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $\pi^+\pi^-p\bar{p}$                              | $0,15 \pm 0,10$                 | 1381              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $\gamma (J/\psi) (3100)$                          | $15,5 \pm 1,8$                  | 429               |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $2 (\pi^+\pi^-)$ (включая $\pi\pi\rho$ )          | $2,3 \pm 0,5$                   | 1750              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $\pi^+\pi^-K^+K^-$ (включая $\pi K\bar{K}^*$ )    | $2,0 \pm 0,5$                   | 1656              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $3 (\pi^+\pi^-)$                                  | $1,2 \pm 0,8$                   | 1706              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $\pi^+\pi^-p\bar{p}$                              | $0,35 \pm 0,14$                 | 1410              |
| $\psi$ (3685) | $0^- (1^-) -$                     | $3686,0 \pm 0,1$<br>$m_\psi$ (3685) —<br>— $m_\psi$ (3100) =<br>= 589,06 (13) | $0,215 \pm 0,040$               | $\pi^+\pi^-$                                      | $0,20 \pm 0,11$                 | 1772              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $K^+K^-$                                          | $0,16 \pm 0,12$                 | 1708              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $e^+e^-$                                          | $0,9 \pm 0,1$                   | 1843              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | $\mu^+\mu^-$                                      | $0,8 \pm 0,2$                   | 1840              |
|               |                                   |                                                                               |                                 | Адроны + излучение                                | $98,1 \pm 0,3$                  | —                 |
|               |                                   |                                                                               |                                 |                                                   |                                 |                   |
|               |                                   |                                                                               |                                 |                                                   |                                 |                   |

## Распады в адроны

|  |  |  |  |                                        |                   |      |
|--|--|--|--|----------------------------------------|-------------------|------|
|  |  |  |  | $(J/\psi) \pi^+\pi^-$                  | $33 \pm 2$        | 477  |
|  |  |  |  | $(J/\psi) \pi^0\pi^0$                  | $17 \pm 2$        | 481  |
|  |  |  |  | $(J/\psi) \eta$                        | $2,8 \pm 0,6$     | 196  |
|  |  |  |  | $2 (\pi^+\pi^-) \pi^0$                 | $0,35 \pm 0,15$   | 1799 |
|  |  |  |  | $\pi^+\pi^-K^+K^-$                     | $0,16 \pm 0,04$   | 1726 |
|  |  |  |  | $(J/\psi) \pi^0$                       | $0,10 \pm 0,03$   | 528  |
|  |  |  |  | $p\bar{p}\pi^+\pi^-$                   | $0,08 \pm 0,02$   | 1491 |
|  |  |  |  | $K^{*0} (892) K^- \pi^+ + \text{с.с.}$ | $0,067 \pm 0,025$ | 1674 |
|  |  |  |  | $2 (\pi^+\pi^-)$                       | $0,05 \pm 0,01$   | 1817 |
|  |  |  |  | $\rho^0\pi^+\pi^-$                     | $0,042 \pm 0,015$ | 1751 |
|  |  |  |  | $p\bar{p}$                             | $0,019 \pm 0,005$ | 1586 |
|  |  |  |  | $3 (\pi^+\pi^-)$                       | $0,015 \pm 0,010$ | 1774 |
|  |  |  |  | $K^+K^-$                               | $0,010 \pm 0,007$ | 1776 |
|  |  |  |  | $\pi^+\pi^-$                           | $0,008 \pm 0,005$ | 1838 |
|  |  |  |  | $\rho\pi$                              | $< 0,1$           | 1760 |
|  |  |  |  | $\Lambda\bar{\Lambda}$                 | $< 0,04$          | 1467 |

## Радиационные распады

|  |  |  |  |                                                   |                 |      |
|--|--|--|--|---------------------------------------------------|-----------------|------|
|  |  |  |  | $\Upsilon\chi$ (3415)                             | $8,2 \pm 1,4$   | 261  |
|  |  |  |  | $\Upsilon\chi$ (3510)                             | $8,0 \pm 1,3$   | 172  |
|  |  |  |  | $\Upsilon\chi$ (3555)                             | $7,4 \pm 1,3$   | 128  |
|  |  |  |  | $\Upsilon\eta_c$ (2980)                           | $0,43 \pm 0,26$ | 638  |
|  |  |  |  | $\Upsilon\eta_c'$ (3590)                          | От 0,2 до 1,3   | 91   |
|  |  |  |  | $\Upsilon\pi^0$                                   | $< 0,5$         | 1841 |
|  |  |  |  | $\Upsilon\eta$                                    | $< 0,02$        | 1802 |
|  |  |  |  | $\Upsilon\eta'$                                   | $< 0,02$        | 1719 |
|  |  |  |  | $\Upsilon' (1440) \rightarrow \gamma K\bar{K}\pi$ | $< 0,012$       | 1562 |



| Частица                                       | Квантовые числа<br>$I^G(J^P)C_n$ | Масса покоя<br>$M$ , МэВ                                                            | Полная ширина<br>$\Gamma$ , МэВ | Продукты распада                                                                                                                                                                  | Относительная<br>вероятность, %                                                                                   | $p$ ,<br>МэВ/c                                 |
|-----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| $\psi$ (3770)                                 | $(1^-) -$                        | 3770 (3)<br>$m_\psi$ (3770) —<br>— $m_\psi$ (3685) =<br>= 83,9 (2,4)<br>$S = 1,8$   | 25 (3)                          | $e^+e^-$<br>$D\bar{D}$                                                                                                                                                            | $0,0011 \pm 0,0002$<br>Доминирует                                                                                 | 1885<br>242                                    |
| $\psi$ (4030)                                 | $(1^-) -$                        | 4030 (5)                                                                            | 52 (10)                         | $e^+e^-$<br>Адроны<br>$D\bar{D}$<br>$D\bar{D}^* + D^*\bar{D}$<br>$D^*\bar{D}^*$                                                                                                   | $0,0014 \pm 0,0004$<br>Доминируют<br>Обнаружен                                                                    | 2015<br>—<br>752<br>559<br>177                 |
| $\psi$ (4160)                                 | $(1^-) -$                        | 4159 (20)                                                                           | 78 (20)                         | $e^+e^-$<br>Адроны                                                                                                                                                                | $0,0010 \pm 0,0004$<br>Доминируют                                                                                 | 2079<br>—                                      |
| $\psi$ (4415)                                 | $(1^-) -$                        | 4415 (6)                                                                            | 43 (20)                         | $e^+e^-$<br>Адроны                                                                                                                                                                | $0,0010 \pm 0,0003$<br>Доминируют                                                                                 | 2207<br>—                                      |
| $\Upsilon$ (9460)<br>или $\Upsilon$ (1S)      | $(1^-) -$                        | 9460,0 (3)<br>$S = 1,6$                                                             | 0,0443 (66)                     | $\mu^+\mu^-$<br>$e^+e^-$<br>$\tau^+\tau^-$                                                                                                                                        | $2,9 \pm 0,5$<br>$2,5 \pm 0,5$<br>$3,4 \pm 0,8$                                                                   | 4729<br>4730<br>4381                           |
| $\chi_b$ (9875)<br>или $\chi_b$ ( $1^3P_0$ )  | $( ) +$                          | 9872,9 (5,8)                                                                        | —                               | $\gamma\Upsilon$ (9460)                                                                                                                                                           | Обнаружен                                                                                                         | 404                                            |
| $\chi_b$ (9895)<br>или $\chi_b$ ( $1^3P_1$ )  | $( ) +$                          | 9894,5 (3,5)                                                                        | —                               | $\gamma\Upsilon$ (9460)                                                                                                                                                           | $43 \pm 11$                                                                                                       | 425                                            |
| $\chi_b$ (9915)<br>или $\chi_b$ ( $1^3P_2$ )  | $( ) +$                          | 9914,6 (2,4)                                                                        | —                               | $\gamma\Upsilon$ (9460)                                                                                                                                                           | $20,0 \pm 4,4$                                                                                                    | 444                                            |
| $\Upsilon$ (10025)<br>или $\Upsilon$ (2S)     | $(1^-) -$                        | 10023,4 (3)<br>$m_\Upsilon$ (10025) —<br>— $m_\Upsilon$ (9460) =<br>= 563,3 (4)     | 0,0296 (47)                     | $\mu^+\mu^-$<br>$e^+e^-$<br>$\Upsilon$ (9460) $\pi\pi$<br>$\Upsilon\chi_b$ (9875)<br>$\Upsilon\chi_b$ (9895)<br>$\Upsilon\chi_b$ (9915)                                           | $1,9 \pm 1,8$<br>$1,6 \pm 0,3$<br>$19,5 \pm 1,7$<br>$3,5 \pm 1,4$<br>$5,9 \pm 1,4$<br>$6,1 \pm 1,4$               | 5011<br>5012<br>476<br>149<br>128<br>108       |
| $\chi_b$ (10255)<br>или $\chi_b$ ( $2^3P_1$ ) | $( ) +$                          | 10253,7 (3,4)                                                                       | —                               | $\gamma\Upsilon$ (9460)<br>$\gamma\Upsilon$ (10025)                                                                                                                               | Обнаружен                                                                                                         | 763<br>228                                     |
| $\chi_b$ (10270)<br>или $\chi_b$ ( $2^3P_2$ ) | $( ) +$                          | 10271,0 (2,4)                                                                       | —                               | $\gamma\Upsilon$ (9460)<br>$\gamma\Upsilon$ (10025)                                                                                                                               | Обнаружен                                                                                                         | 779<br>245                                     |
| $\Upsilon$ (10355)<br>или $\Upsilon$ (3S)     | $(1^-) -$                        | 10355,5 (5)<br><br>$m_\Upsilon$ (10355) —<br>— $m_\Upsilon$ (9460) =<br>= 895,5 (6) | 0,0177 (51)                     | $e^+e^-$<br>$\mu^+\mu^-$<br>$\Upsilon$ (9460) $\pi^+\pi^-$<br>$\Upsilon$ (10025) $\pi^+\pi^-$<br>$\Upsilon\chi_b$ (10235)<br>$\Upsilon\chi_b$ (10255)<br>$\Upsilon\chi_b$ (10270) | $2,0 \pm 0,7$<br>$3,3 \pm 2,0$<br>$5,1 \pm 1,1$<br>$3 \pm 3$<br>$7,6 \pm 3,5$<br>$15,6 \pm 4,2$<br>$12,7 \pm 4,1$ | 5178<br>5177<br>814<br>177<br>122<br>101<br>84 |
| $\Upsilon$ (10575)<br>или $\Upsilon$ (4S)     | $(1^-) -$                        | 10573 (4)<br>$m_\Upsilon$ (10575) —<br>— $m_\Upsilon$ (9460) =<br>= 1113 (4)        | 14 (5)                          | $e^+e^-$                                                                                                                                                                          | $0,0017 \pm 0,0007$                                                                                               | 5286                                           |

| Частица                 | Квантовые числа<br>$I^G (J^P)_{C_n}$ | Масса покоя<br>$M$ , МэВ                                                               | Полная ширина<br>$\Gamma$ , МэВ | Продукты распада                                                                                    | Относительная<br>вероятность, %                                                                                                                              | $\rho$ ,<br>МэВ/с                             |
|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <i>Странные мезоны</i>  |                                      |                                                                                        |                                 |                                                                                                     |                                                                                                                                                              |                                               |
| $K^*$ (892)             | $1/2 (1^-)$                          | 892,1 (4)<br>$S = 1,4$<br>$m^0 - m^\pm =$<br>$= 6,7 \pm$<br>$\pm 1,2$ МэВ<br>1270 (10) | 51,3 (1,0)<br>$S = 1,1$         | $K\pi$<br>$K\gamma$<br>$K\pi\pi$                                                                    | $\sim 100$<br>$0,10 \pm 0,01$<br>$< 0,05$                                                                                                                    | 288<br>309<br>216                             |
| $Q$ (1280)<br>или $Q_1$ | $1/2 (1^+)$                          |                                                                                        | $90 \pm 20$                     | $K\rho$<br>$k$ (1350) $\pi$<br>$K$ (892) $\pi$<br>$K\omega$<br>$K\varepsilon$                       | $42 \pm 6$<br>$28 \pm 4$<br>$16 \pm 5$<br>$11 \pm 2$<br>$3 \pm 2$                                                                                            | 45<br>—<br>298<br>—<br>—                      |
| $k$ (1350)              | $1/2 (0^+)$                          | $\sim 1350$                                                                            | $\sim 250$                      | $K\pi$                                                                                              | Обнаружен                                                                                                                                                    | 574                                           |
| $Q$ (1400)<br>или $Q_2$ | $1/2 (1^+)$                          | 1406 (10)                                                                              | 184 (9)                         | $K^*$ (892) $\pi$<br>$K\rho$<br>$K\varepsilon$<br>$K\omega$                                         | $94 \pm 6$<br>$3 \pm 3$<br>$2 \pm 2$<br>$1 \pm 1$                                                                                                            | 403<br>299<br>—<br>285                        |
| $K^*$ (1430)            | $1/2 (2^+)$                          | 1425 (5)                                                                               | 100 (10)                        | $K\pi$<br>$K^*$ (892) $\pi$<br>$K^*$ (892) $\pi\pi$<br>$K\rho$<br>$K\omega$<br>$K\eta$<br>$K\gamma$ | $44,8 \pm 2,3$ , $S=2,7$<br>$24,5 \pm 2,0$ , $S=1,1$<br>$13,0 \pm 2,6$ , $S=1,1$<br>$8,8 \pm 1,0$ , $S=1,2$<br>$4,2 \pm 1,5$<br>$5 \pm 5$<br>$0,24 \pm 0,05$ | 618<br>417<br>366<br>324<br>310<br>485<br>627 |
| $L$ (1770)              | $1/2 (2^-)$                          | $\sim 1770$                                                                            | $\sim 200$                      | $K^*$ (1430) $\pi$<br>$K^*$ (892) $\pi$<br>$Kf$<br>$K\varphi$                                       | Доминирует<br>}                                                                                                                                              | 286<br>651<br>—                               |
| $K^*$ (1780)            | $1/2 (3^-)$                          | 1780 (10)                                                                              | 160 (20)                        | $K\pi\pi$<br>$K\rho$<br>$K^*$ (892) $\pi$<br>$K\pi$                                                 | }                                                                                                                                                            | 796<br>620<br>657<br>815                      |
| $K^*$ (2060)            | $1/2 (4^+)$                          | 2060 (30)                                                                              | $210 \pm 40$                    | $K\pi$<br>$K^*$ (892) $\pi\pi$<br>$\rho K\pi$<br>$\omega K\pi$<br>$K^*$ (892) $\pi\pi\pi$           | $7 \pm 1$<br>}                                                                                                                                               | 966<br>809<br>751<br>744<br>775               |

*Очарованные нестранные мезоны*

|                 |             |                                                                          |         |                                               |                                        |                 |
|-----------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|
| $D^{*+}$ (2010) | $1/2 (1^-)$ | 2010,1 (7)<br>$m_{D^{*+}} - m_{D^0} =$<br>$= 145,4 \pm$<br>$\pm 0,2$ МэВ | $< 2,0$ | $D^0\pi^+$<br>$D^{*+}\pi^0$<br>$D^{*+}\gamma$ | $64 \pm 11$<br>$28 \pm 9$<br>$8 \pm 7$ | 39<br>38<br>136 |
| $D^{*0}$ (2010) | $1/2 (1^-)$ | 2007,2 (2,1)                                                             | $< 5$   | $D^0\pi^0$<br>$D^{*0}\gamma$                  | $55 \pm 15$<br>$45 \pm 15$             | 44<br>137       |

Таблица 36.6. Характеристики барионных резонансов [5]

| Частица                                                   | Квантовые числа<br>$I(J^P)L_{2I, 2J}$ | Импульс<br>пучка,<br>ГэВ/с | Масса покоя $M$ ,<br>МэВ | Полная ши-<br>рина $\Gamma$ ,<br>МэВ | Продукты<br>распада                                                                                    | Относитель-<br>ная вероят-<br>ность, %                        | $\rho$ ,<br>МэВ/с                                 |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <i>Нуклонные резонансы <math>N, S = 0, I = 1/2</math></i> |                                       |                            |                          |                                      |                                                                                                        |                                                               |                                                   |
| $N(1440)$                                                 | $1/2(1/2^+)P'_{11}$                   | 0,61                       | 1400—1480                | 1200—350<br>(200)                    | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$                             | 50—70<br>8—18<br>~30<br>12—28<br>~7<br>~5                     | 397<br>—<br>342<br>143<br>—<br>—                  |
| $N(1520)$                                                 | $1/2(3/2^-)D'_{13}$                   | 0,74                       | 1510—1530                | 100—140<br>(125)                     | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$                             | 50—60<br>~0,1<br>35—50<br>15—25<br>15—25<br><5                | 456<br>149<br>410<br>228<br>—<br>—                |
| $N(1535)$                                                 | $1/2(1/2^-)S'_{11}$                   | 0,76                       | 1520—1560                | 100—250<br>(150)                     | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$                             | 35—50<br>~35<br>~5<br>~1<br>~3<br>~2                          | 467<br>182<br>422<br>242<br>—<br>—                |
| $N(1650)$                                                 | $1/2(1/2^-)S''_{11}$                  | 0,96                       | 1620—1680                | 100—200<br>(150)                     | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$\Delta K$<br>$\Sigma K$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$ | 55—65<br>~1,5<br>~8<br>3—10<br>~30<br>4—15<br>~20<br><5       | 547<br>346<br>161<br>—<br>511<br>344<br>—<br>—    |
| $N(1675)$                                                 | $1/2(5/2^-)D'_{15}$                   | 1,01                       | 1660—1690                | 120—180<br>(155)                     | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$\Delta K$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$               | 30—40<br>~1<br>~0,1<br>55—70<br>50—65<br>~5<br><5             | 563<br>374<br>209<br>529<br>364<br>—<br>—         |
| $N(1680)$                                                 | $1/2(5/2^+)F'_{15}$                   | 1,01                       | 1670—1690                | 110—140<br>(125)                     | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$                             | 55—65<br><1<br>~40<br>~12<br>~10<br>~20                       | 567<br>379<br>532<br>369<br>—<br>—                |
| $N(1700)$                                                 | $1/2(3/2^-)D''_{13}$                  | 1,05                       | 1670—1730                | 70—120<br>(100)                      | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$\Delta K$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$               | 8—12<br>~4<br>~0,2<br>~85<br>15—40<br>~5<br><40               | 580<br>400<br>250<br>547<br>385<br>—<br>—         |
| $N(1710)$                                                 | $1/2(1/2^+)P''_{11}$                  | 1,07                       | 1680—1740                | 90—130<br>(110)                      | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$\Delta K$<br>$\Sigma K$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\varepsilon$ | 10—20<br>~25<br>~15<br>2—10<br>>50<br>10—25<br>25—65<br>15—40 | 587<br>410<br>264<br>138<br>554<br>393<br>48<br>— |

| Частица   | Квантовые числа<br>$I (J^P) L_{2I, 2J}$ | Импульс<br>пучка,<br>ГэВ/с | Масса покоя $M$ ,<br>МэВ | Полная ш-<br>рина $\Gamma$ , МэВ | Продукты<br>распада                                                                                           | Относитель-<br>ная вероят-<br>ность, %                          | $p$ ,<br>МэВ/с                                            |
|-----------|-----------------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| $N(1720)$ | $1/2 (3/2^+) P''_{13}$                  | 1,09                       | 1690—1800                | 125—250<br>(200)                 | $N\pi$<br>$N\eta$<br>$\Delta K$<br>$\Sigma K$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\epsilon$<br>$N\pi$ | 10—20<br>~3,5<br>~5<br>2—5<br>~70<br>~20<br>45—70<br>~20<br>~14 | 594<br>420<br>278<br>162<br>561<br>401<br>104<br>—<br>888 |
| $N(2190)$ | $1/2 (7/2^- G_{17})$                    | 2,07                       | 2120—2230                | 200—500<br>(350)                 | $N\eta$<br>$\Delta K$<br>$N\pi$                                                                               | ~3<br>~0,3<br>~18                                               | 790<br>712<br>905                                         |
| $N(2220)$ | $1/2 (9/2^+) H_{19}$                    | 2,14                       | 2150—2300                | 300—500<br>(400)                 | $N\eta$<br>$\Delta K$<br>$N\pi$                                                                               | ~0,5<br>~0,2<br>~10                                             | 811<br>732<br>923                                         |
| $N(2250)$ | $1/2 (9/2^-) G'_{19}$                   | 2,21                       | 2130—2270                | 200—500<br>(300)                 | $N\eta$<br>$\Delta K$<br>$N\pi$                                                                               | ~2<br>~0,3<br>~5                                                | 831<br>754<br>1126                                        |
| $N(2600)$ | $1/2 (11/2^-) I_{111}$                  | 3,12                       | 2580—2700                | >300<br>(400)                    | $N\pi$                                                                                                        | ~5                                                              | —                                                         |

Дельта-резонансы  $\Delta$ ,  $S = 0$ ,  $I = 3/2$ 

|                |                         |      |           |                  |                                                             |                                     |                                 |
|----------------|-------------------------|------|-----------|------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| $\Delta(1232)$ | $3/2 (3/2^+) P'_{33}$   | 0,30 | 1230—1234 | 110—120<br>(115) | $N\pi$                                                      | 99,4                                | 227                             |
| $\Delta(1620)$ | $3/2 (1/2^-) S'_{31}$   | 0,91 | 1600—1650 | 120—160<br>(140) | $N\eta$<br>$N\pi$                                           | 0,6<br>25—35                        | 259<br>526                      |
| $\Delta(1700)$ | $3/2 (3/2^-) D'_{33}$   | 1,05 | 1630—1740 | 190—300<br>(250) | $N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\pi$               | ~70<br>35—50<br><40<br>10—20        | 488<br>318<br>—<br>580          |
| $\Delta(1900)$ | $3/2 (1/2^-) S''_{31}$  | 1,44 | 1850—2000 | 130—300<br>(150) | $N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\pi$               | ~85<br>~50<br>~40<br>6—12           | 547<br>385<br>—<br>710          |
| $\Delta(1905)$ | $3/2 (5/2^+) F_{35}$    | 1,45 | 1890—1920 | 250—400<br>(300) | $\Sigma K$<br>$N\pi$                                        | ~10<br>8—15                         | 410<br>713                      |
| $\Delta(1910)$ | $3/2 (1/2^+) P''_{31}$  | 1,46 | 1850—1950 | 200—330<br>(220) | $\Sigma K$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\pi$ | <3<br>~80<br>10—30<br>~60<br>20—25  | 415<br>687<br>542<br>421<br>716 |
| $\Delta(1920)$ | $3/2 (3/2^+) P'''_{33}$ | 1,48 | 1860—2160 | 190—300<br>(250) | $\Sigma K$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\pi$ | 2—20<br>>40<br>Мала<br><40<br>14—20 | 421<br>691<br>545<br>426<br>722 |
| $\Delta(1930)$ | $3/2 (5/2^-) D'_{35}$   | 1,50 | 1890—1960 | 150—350<br>(250) | $\Sigma K$<br>$N\pi$                                        | ~5<br>4—14                          | 431<br>729                      |
|                |                         |      |           |                  | $\Sigma K$                                                  | <10                                 | 441                             |

| Частица          | Квантовые числа<br>$I(J^P)L_{I,2I}$ | Импульс<br>пучка,<br>ГэВ/с                      | Масса покоя $M$ ,<br>МэВ | Полная шир-<br>рина $\Gamma$ , МэВ | Продукты<br>распада                                                               | Относитель-<br>ная вероят-<br>ность, %               | $P$ ,<br>МэВ/с                          |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $\Delta(1950)$   | $3/2(7/2^+)F'_{37}$                 | 1,54                                            | 1910—1960                | 200—340<br>(240)                   | $\Sigma K$<br>$N\pi$<br>$N\pi\pi$<br>$\Delta\pi$<br>$N\rho$<br>$N\pi$             | $<1$<br>35—45<br>~60<br>~40<br>~20<br>5—15           | 460<br>741<br>716<br>574<br>469<br>1023 |
| $\Delta(2420)$   | $3/2(11/2^+)H_{311}$                | 2,64                                            | 2380—2450                | 300—500<br>(300)                   |                                                                                   |                                                      |                                         |
| $I(J^P)L_{I,2I}$ |                                     | Лямбда-резонансы $\Lambda$ , $S = -1$ , $I = 0$ |                          |                                    |                                                                                   |                                                      |                                         |
| $\Lambda(1405)$  | $0(1/2^-)S'_{01}$                   | Ниже<br>( $K^-p$ )-поро-<br>га                  | $1405 \pm 5$             | $40 \pm 10$                        | $\Sigma\pi$                                                                       | 100                                                  | 152                                     |
| $\Lambda(1520)$  | $0(3/2^-)D'_{03}$                   | 0,395                                           | $1519 \pm 1,0$           | $15,6 \pm 1,0$                     | $N\bar{K}$<br>$\Sigma\pi$<br>$\Lambda\pi\pi$<br>$\Sigma\pi\pi$<br>$\Lambda\gamma$ | 45 (1)<br>42 (1)<br>10 (1)<br>0,9 (0,1)<br>0,8 (0,2) | 244<br>267<br>252<br>152<br>351         |
| $\Lambda(1600)$  | $0(1/2^+)P'_{01}$                   | 0,58                                            | 1560—1700                | 50—250<br>(150)                    | $N\bar{K}$                                                                        | 15—30                                                | 343                                     |
| $\Lambda(1670)$  | $0(1/2^-)S''_{01}$                  | 0,74                                            | 1660—1680                | 25—50<br>(35)                      | $\Sigma\pi$<br>$N\bar{K}$                                                         | 10—60<br>15—25                                       | 336<br>414                              |
| $\Lambda(1690)$  | $0(3/2^-)D''_{03}$                  | 0,78                                            | 1685—1695                | 50—70<br>(60)                      | $\Sigma\pi$<br>$\Lambda\eta$<br>$N\bar{K}$                                        | 20—60<br>15—35<br>20—30                              | 393<br>64<br>433                        |
| $\Lambda(1800)$  | $0(1/2^-)S'''_{01}$                 | 1,01                                            | 1720—1850                | 200—400<br>(300)                   | $\Sigma\pi$<br>$\Lambda\pi\pi$<br>$\Sigma\pi\pi$<br>$N\bar{K}$                    | 20—40<br>~25<br>~20<br>25—40                         | 409<br>415<br>350<br>528                |
| $\Lambda(1800)$  | $0(1/2^+)P''_{01}$                  | 1,01                                            | 1750—1850                | 50—250<br>(150)                    | $\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$N\bar{K}^*$ (892)<br>$N\bar{K}$              | Обнаружен<br>20—50                                   | 493<br>345<br>—<br>528                  |
| $\Lambda(1820)$  | $0(5/2^+)F'_{05}$                   | 1,06                                            | 1815—1825                | 70—90<br>(80)                      | $\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$N\bar{K}^*$ (892)<br>$N\bar{K}$              | 10—40<br>Обнаружен<br>30—60<br>55—65                 | 493<br>345<br>—<br>545                  |
| $\Lambda(1830)$  | $0(5/2^-)D_{05}$                    | 1,08                                            | 1810—1830                | 60—110<br>(95)                     | $\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$N\bar{K}$                                    | 8—14<br>5—10<br>3—10                                 | 508<br>362<br>553                       |
| $\Lambda(1890)$  | $0(3/2^+)P'_{03}$                   | 1,21                                            | 1850—1910                | 60—200<br>(100)                    | $\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$N\bar{K}$                                    | 35—75<br>>15<br>20—35                                | 515<br>371<br>599                       |
| $\Lambda(2100)$  | $0(7/2^-)G_{07}$                    | 1,68                                            | 2090—2110                | 100—250<br>(200)                   | $\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$NK^*$ (892)<br>$N\bar{K}$                    | 3—10<br>Обнаружен<br>25—35                           | 559<br>420<br>233<br>751                |
|                  |                                     |                                                 |                          |                                    | $\Sigma\pi$<br>$\Lambda\eta$<br>$\Xi K$<br>$\Lambda\omega$<br>$N\bar{K}^*$ (892)  | ~5<br><3<br><3<br><8<br>10—20                        | 704<br>617<br>483<br>443<br>514         |

| Частица                                       | Квантовые числа<br>$I(J^P) L_{2I,2J}$ | Импульс<br>пучка,<br>ГэВ/с | Масса покоя $M$ ,<br>МэВ                                                                     | Полная ши-<br>рина $\Gamma$ , МэВ                           | Продукты<br>распада                                                                                                                           | Относитель-<br>ная вероят-<br>ность, %                       | $p$ ,<br>МэВ/с                                       |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $\Lambda(2110)$                               | $0(5/2^+) F''_{05}$                   | 1,70                       | 2090—2140                                                                                    | 150—250<br>(200)                                            | $N\bar{K}$<br>$\Sigma\pi$<br>$\Lambda\omega$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$N\bar{K}^*(892)$                                                        | 5—25<br>10—40<br>Обнаружен<br>10—60                          | 757<br>711<br>455<br>589<br>524                      |
| $\Lambda(2350)$                               | $0(9/2^+)$                            | 2,29                       | 2340—2370                                                                                    | 100—250<br>(150)                                            | $N\bar{K}$<br>$\Sigma\pi$                                                                                                                     | $\sim 12$<br>$\sim 10$                                       | 915<br>867                                           |
| Сигма-резонансы $\Sigma$ , $S = -1$ , $I = 1$ |                                       |                            |                                                                                              |                                                             |                                                                                                                                               |                                                              |                                                      |
| $\Sigma(1385)$                                | $1(3/2^+) P'_{13}$                    | Ниже( $K^-p$ )-<br>порога  | (+) 1382,3<br>(0,4), $S=1,6$<br>(0) 1382,0<br>(2,5), $S=1,6$<br>(-) 1387,4<br>(0,6), $S=2,2$ | 35(1), $S=$<br>$=1,0$<br>$\sim 35$<br>40(2), $S=$<br>$=1,9$ | $\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$<br>$N\bar{K}$                                                                                                     | 88(2)<br>12(2)<br>Обнаружен                                  | 208<br>127<br>439<br>385                             |
| $\Sigma(1660)$                                | $1(1/2^+) P'_{11}$                    | 0,72                       | 1630—1690                                                                                    | 40—200<br>(100)                                             | $N\bar{K}$<br>$\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$                                                                                                     | 10—30<br>Обнаружен                                           | 405<br>439<br>385                                    |
| $\Sigma(1670)$                                | $1(3/2^-) D''_{13}$                   | 0,74                       | 1665—1685                                                                                    | 40—80<br>(60)                                               | $N\bar{K}$<br>$\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$                                                                                                     | 7—13<br>5—15<br>30—60                                        | 414<br>447<br>393                                    |
| $\Sigma(1750)$                                | $1(1/2^-) S''_{11}$                   | 0,91                       | 1730—1800                                                                                    | 60—160<br>(90)                                              | $N\bar{K}$<br>$\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$<br>$\Sigma\eta$                                                                                     | 10—40<br>Обнаружен<br><8<br>15—55                            | 486<br>507<br>455<br>81                              |
| $\Sigma(1775)$                                | $1(5/2^-) D_{15}$                     | 0,96                       | 1770—1780                                                                                    | 105—135<br>(120)                                            | $N\bar{K}$<br>$\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$\Lambda(1520)\pi$                                                          | 37—43<br>14—20<br>2—5<br>8—12<br>17—23                       | 508<br>525<br>474<br>324<br>198                      |
| $\Sigma(1915)$                                | $1(5/2^+) F'_{15}$                    | 1,26                       | 1900—1935                                                                                    | 80—160<br>(120)                                             | $N\bar{K}$<br>$\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$                                                                                | 5—15<br>Обнаружен<br><5<br><20                               | 618<br>622<br>577<br>440                             |
| $\Sigma(1940)$                                | $1(3/2^-) D'''_{13}$                  | 1,32                       | 1900—1950                                                                                    | 150—300<br>(220)                                            | $N\bar{K}$<br>$\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$\Lambda(1520)\pi$<br>$\Delta(1232)\bar{K}$<br>$N\bar{K}^*(892)$            | Обнаружен<br>639<br>594<br>460<br>354<br>410<br>320          | 637<br>639<br>594<br>460<br>354<br>410<br>320        |
| $\Sigma(2030)$                                | $1(7/2^+) F_{17}$                     | 1,52                       | 2025—2040                                                                                    | 150—200<br>(180)                                            | $N\bar{K}$<br>$\Lambda\pi$<br>$\Sigma\pi$<br>$\Xi K$<br>$\Sigma(1385)\pi$<br>$\Lambda(1520)\pi$<br>$\Delta(1232)\bar{K}$<br>$N\bar{K}^*(892)$ | 17—23<br>17—23<br>5—10<br><2<br>5—15<br>10—20<br>10—20<br><5 | 702<br>700<br>657<br>412<br>529<br>430<br>498<br>438 |

| Частица                                                                                                               | Квантовые числа<br>$I(J^P) L_{2I, 2J}$ | Импульс<br>пучка,<br>ГэВ/с | Масса покоя $M$ ,<br>МэВ                         | Полная ширина $\Gamma$ , МэВ                          | Продукты<br>распада                                                                                                                              | Относительная вероят-<br>ность, %                        | $p$ ,<br>МэВ/с                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $\Sigma(2250)$                                                                                                        | 1 (?)                                  | 2,04                       | 2210—2280                                        | 60—150<br>(100)                                       | $N\bar{K}$<br>$\Delta\pi$<br>$\Sigma\pi$                                                                                                         | $<10$<br>} Обнаружен                                     | 851<br>842<br>803                                           |
| <i><math>I(J^P) L_{2I, 2J}</math> Каскадные резонансы <math>\Xi</math>, <math>S = -2</math>, <math>I = 1/2</math></i> |                                        |                            |                                                  |                                                       |                                                                                                                                                  |                                                          |                                                             |
| $\Xi(1530)$                                                                                                           | $1/2(3/2^+) P_{13}$                    | —                          | (0) 1531,8 (0,3)<br>$S = 1,3$<br>(—) 1535,0(0,6) | 9,1 (0,5)<br>10,1 (1,9)                               | $\Xi\pi$<br>$\Delta\bar{K}$<br>$\Sigma\bar{K}$<br>$\Xi\pi$<br>$\Xi(1530)\pi$<br>$\Delta\bar{K}$<br>$\Sigma\bar{K}$<br>$\Xi\pi$<br>$\Xi(1530)\pi$ | 100<br>~45<br>~10<br>Мала<br>~45<br>~20<br>~80<br>} Мала | 148<br>396<br>306<br>413<br>231<br>587<br>524<br>573<br>418 |
| $\Xi(1820)$                                                                                                           | $1/2(3/2)$                             | —                          | 1823 (6)                                         | $20 \begin{smallmatrix} +15 \\ -10 \end{smallmatrix}$ |                                                                                                                                                  |                                                          |                                                             |
| $\Xi(2030)$                                                                                                           | $1/2(?)$                               | —                          | 2024 (6)                                         | $16 \begin{smallmatrix} +15 \\ -5 \end{smallmatrix}$  |                                                                                                                                                  |                                                          |                                                             |

ет, что в данном столбце таблицы приведены каналы распада частицы  $a^-(a^-=\mu^-, \tau^- \text{ и т. п.})$ , которые представляют собой также каналы распада частицы  $a^+(a^+=\mu^+, \tau^+ \text{ и т. п.})$  после замены всех продуктов распада зарядово-сопряженными.

В тех случаях, когда среднее время жизни указано через массу частицы, для получения времени жизни частицы в секундах необходимо подставить ее массу в мегаэлектрон-вольтах. Иногда вместо среднего времени жизни приводится средняя ширина состояния  $\Gamma$  в энергетических единицах.

### 36.7. МЕЗОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

Зарядовая четность нейтральных мезонных резонансов с нулевыми странностью, очарованием и другими характеристиками, входящих в состав изотопического мультиплета, обозначается символом  $S_n$ . Надежно установленные квантовые числа мезонных резонансов в табл. 36.5 подчеркнуты; отсутствие черты означает, что указанные квантовые числа наиболее вероятны. Цифры в скобках после символа частицы, например  $K^*(892)$ , означают массу частицы в мегаэлектрон-вольтах и служат для идентификации данной частицы. Остальные обозначения те же, что в табл. 36.4.

### 36.8. БАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

В табл. 36.6 в колонке «Импульс пучка» приведены значения импульса  $p$  первичных частиц ( $\pi^-$  или  $K^-$ -мезонов), отвечающие образованию соответствующего барионного резонанса в  $\pi(K)p$ -соударения в лабораторной системе отсчета. Символ  $L_{2I, 2J}$  является спектроскопическим обозначением барионных резонансов со странностью  $S=0, -2$ ; символ  $L_{I, 2J}$  — спектроскопическим обозначением барионных резонансов со странностью  $S=-1$ ;  $L$  — символ орбитального состояния мезона и бариона, образующих данный резонанс, причем символам  $S, P$ ,

$D, F \dots$  отвечают значения орбитального квантового числа  $L=0, 1, 2, 3 \dots$  соответственно. Штрихами при спектроскопическом символе различают состояния с одинаковыми квантовыми числами. В колонке «Полная ширина  $\Gamma$ » в скобках приводится предпочтительное значение этого параметра. Остальные пояснения те же, что в § 36.6, 36.7.

### 36.9. МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

$\mu_B = e\hbar/(2m_e c) = 0,57883785 \cdot 10^{-10}$  МэВ/Тл — магнетон Бора для электрона;

$\mu_\mu = e\hbar/(2m_\mu c) = 0,2799541 \cdot 10^{-12}$  МэВ/Тл — магнетон Бора для мюона;

$\mu_N = e\hbar/(2m_p c) = 3,1524515 \cdot 10^{-14}$  МэВ/Тл — ядерный магнетон Бора.

| Частица    | Магнитный момент [5]        |
|------------|-----------------------------|
| $e$        | 1,001159652209 (31) $\mu_B$ |
| $\mu$      | 1,001165924 (9) $\mu_\mu$   |
| $p$        | 2,7928456 (11) $\mu_N$      |
| $n$        | -1,91304184 (88) $\mu_N$    |
| $\Lambda$  | -0,613 (4) $\mu_N$          |
| $\Sigma^+$ | 2,379 (20) $\mu_N$          |
| $\Sigma^-$ | -1,10 (5) $\mu_N$           |
| $\Xi^0$    | -1,250 (14) $\mu_N$         |
| $\Xi^-$    | -1,85 (75) $\mu_N$          |

Таблица 36.7. Параметры распада элементарных частиц

| Схема распада                      | $\alpha$           | $\varphi$ , град | $\gamma$ | $\Delta$ , град    |
|------------------------------------|--------------------|------------------|----------|--------------------|
| $\Lambda \rightarrow p\pi^-$       | $0,642 \pm 0,013$  | $-6,5 \pm 3,5$   | $0,76$   | $7,7 \pm 4,1$      |
| $\Lambda \rightarrow n\pi^0$       | $0,646 \pm 0,044$  | —                | —        | —                  |
| $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$      | $-0,979 \pm 0,016$ | $36 \pm 34$      | $0,17$   | $187 \pm 6$        |
| $\Sigma^+ \rightarrow n\pi^0$      | $0,068 \pm 0,013$  | $167 \pm 20$     | $-0,97$  | $-73^{+134}_{-10}$ |
| $\Sigma^- \rightarrow p\gamma$     | $-0,72 \pm 0,29$   | —                | —        | —                  |
| $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$      | $-0,068 \pm 0,008$ | $10 \pm 15$      | $0,98$   | $249^{+12}_{-116}$ |
| $\Xi^0 \rightarrow \Lambda\pi^0$   | $-0,413 \pm 0,022$ | $21 \pm 12$      | $0,85$   | $218^{+12}_{-18}$  |
| $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$   | $-0,434 \pm 0,015$ | $2 \pm 6$        | $0,90$   | $184 \pm 12$       |
| $\Omega^- \rightarrow \Lambda K^-$ | $-0,10 \pm 0,38$   | —                | —        | —                  |

## 36.10. ПАРАМЕТРЫ РАСПАДОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Пусть  $S$  и  $P$  — амплитуды вероятностей распада на две частицы, находящиеся в  $s$ - и  $p$ -состояниях по относительному орбитальному моменту. Тогда

$$\alpha = \frac{2|S||P|\cos\Delta}{|S|^2 + |P|^2}; \quad \beta = \frac{-2|S||P|\sin\Delta}{|S|^2 + |P|^2};$$

$$\beta = \sqrt{1 - \alpha^2} \sin \varphi; \quad \gamma = \sqrt{1 - \alpha^2} \cos \varphi.$$

Значения  $\alpha$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$ ,  $\Delta$  приведены в табл. 36.7

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий: Пер. с англ. М.: Мир, 1975.
2. Клоуз Ф. Кварки и партоны. Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
3. Окуй Л. Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981.
4. Андреев И. В. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. М.: Наука, 1981.
5. Reviews of particle properties/Rev. Mod. Phys. 1984. Vol. 56, No 2. Pt. II. P. S2—S304.

## Глава 37 ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ

В. М. Кулаков

### 37.1. ТАБЛИЦА НУКЛИДОВ

В соответствии с общепринятой терминологией атомы с данным числом протонов и нейтронов в ядре принято называть *нуклидами*. Нуклиды с одинаковым числом протонов (т. е. принадлежащие одному химическому элементу) называют *изотопами*.

В табл. 37.1 приведены все достоверно известные радиоактивные и стабильные нуклиды в порядке возрастания массового числа для каждого элемента. Данные расположены в шести колонках. В первой колонке приведен общепринятый символ элемента и его зарядовое число  $Z$ . Во второй колонке указано массовое число  $A$  [символ  $m$ , следующий за массовым числом, означает, что приведено метастабильное состояние нуклида; метастабильные состояния приведены лишь тогда, когда их периоды полураспада достаточно велики ( $\geq 1$  с), чтобы идентифицировать их независимо от основных состояний; символы  $m_1$  и  $m_2$  означают различные метастабильные состояния одного нуклида]. В третьей колонке дан полный период полураспада нуклида на основании данных международного файла ENSDF—Evaluated Nuclear Structure and Data File (в скобках указано стандартное отклонение  $\Delta T_{1/2}$  в единицах младших разрядов приведенного числа).

В четвертой колонке приведен основной тип распада нуклида. Используются следующие обозначения:  $\alpha$ — $\alpha$ -распад;  $\beta^-$ —электронный распад;  $\beta^+$ —позитронный распад;  $\epsilon, \epsilon, \epsilon$ —захват орбитального электрона;  $\beta n, \beta p, \epsilon, \epsilon, \epsilon$ —испускание нейтронов и протонов из возбужденных состояний, возникающих в результате  $\beta$ -распада или захвата орбитального электрона; и п. — изомерный переход (распад из возбужденного метастабильного состояния с переходом на более низкий уровень); с.д. — спонтанное деление. Если у ядра существует несколько типов распада, то все они указаны в этой колонке. В ряде случаев за символом типа распада в круглых скобках приведена относительная доля (в процентах) способа распада, например,  $\epsilon, \epsilon, \epsilon$  (60). Отсутствие скобок при наличии нескольких типов распада означает, что относительная доля распада не определена. Для стабильных нуклидов приведены (в процентах) значения относительной распространенности нуклида в земной коре. Данные взяты из [5] и соответствуют оцененным значениям, полученным в основном методом масс-спектрометрии, для основных земных образцов. Эти данные выделены полужирным шрифтом. Для радиоактивных нуклидов с очень большими периодами полураспада (поэтому сохранившихся в земной коре) указаны как процентное содержание, так и тип распада, например  $^{87}\text{Rb} \xrightarrow{\beta^-} ^{87}\text{Sr}$  (48,8%). Цифры в круглых скобках, приведенные за значениями распространенности стабильных нуклидов, указывают стандартное отклонение в единицах младших разрядов. Эти погрешности перекрывают интервал как возможных естественных вариаций изотопного состава, так и экспериментальных погрешностей.

В пятой колонке указаны значения энергий (в мегаэлектрон-вольтах) групп наиболее интенсивных частиц ( $\alpha, \beta^-, \beta^+, n, p$ ), испускаемых при распаде нуклида. В круглых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в процентах) на полное число распадов. В косых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в процентах) только для конкретного типа распада. Для сплошных  $\beta^-$ - и  $\beta^+$ -спектров представлены, как правило, значения граничной энергии  $\beta$ -группы с наибольшей энергией. Если  $\beta$ -группа с наибольшей энергией имеет относительно слабую интенсивность, то приводятся значения граничной энергии и интенсивности одной или нескольких  $\beta$ -групп с меньшими граничными энергиями.



Таблица 37.1. Таблица нуклидов [1, 2]

| Элемент       | A      | Период полураспада           | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                |
|---------------|--------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|               |        |                              |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                            |
| $^1\text{H}$  | 1      | } Стабилен<br>12,33 (6) года | 99,985 (1)                                                              | —                                             | —                                                              |
|               | 2      |                              | 0,015 (1)                                                               | —                                             | —                                                              |
|               | 3      |                              | $\beta^-$                                                               | 0,0186                                        | —                                                              |
| $^2\text{He}$ | 3      | } Стабилен                   | $1,38 (3) \cdot 10^{-4}$                                                | —                                             | —                                                              |
|               | 4      |                              | 99,999862 (3)                                                           | —                                             | —                                                              |
|               | 6      |                              | $\beta^-$                                                               | 3,508                                         | —                                                              |
|               | 8      |                              | $\beta^-$ , $\beta^- n$ (12)                                            | —                                             | 0,98 (88)                                                      |
| $^3\text{Li}$ | 6      | } Стабилен                   | 7,5 (2)                                                                 | —                                             | —                                                              |
|               | 7      |                              | 92,5 (2)                                                                | —                                             | —                                                              |
|               | 8      |                              | $\beta^-$                                                               | 13                                            | —                                                              |
|               |        |                              | $2\alpha$                                                               | 1,6                                           | —                                                              |
|               | 9      |                              | $\beta^-$                                                               | 13,61                                         | —                                                              |
|               |        |                              | $n$                                                                     | 0,76                                          | —                                                              |
| $^4\text{Be}$ | 11     | 0,0085 с                     | $\beta^-$ , $\beta^- n$ (61)                                            | —                                             | —                                                              |
|               | 7      | 53,44 (9) сут                | э. з.                                                                   | —                                             | 0,477 (10,3)                                                   |
|               | 9      | Стабилен                     | 100                                                                     | —                                             | —                                                              |
|               | 10     | $1,6 (2) 10^6$ лет           | $\beta^-$                                                               | 0,555                                         | —                                                              |
|               | 11     | 13,81 (8) с                  | $\beta^-$                                                               | 11,5                                          | } 2,14 (32); 4,67 (2,1);<br>5,85 (2,4); 6,79 (4,4); 7,99 (1,7) |
|               |        |                              | $\beta^- \alpha$                                                        | 0,77                                          |                                                                |
|               | 12     | 0,0114 (5) с                 | $\beta^-$                                                               | 11,7                                          |                                                                |
| $^5\text{B}$  | 8      | 0,769 (4) с                  | $\beta^+$                                                               | 14,1                                          | —                                                              |
|               |        |                              | $2\alpha$                                                               | 8,3; 1,6                                      | —                                                              |
|               | 10     | } Стабилен                   | 19,9 (2)                                                                | —                                             | —                                                              |
|               | 11     |                              | 80,1 (2)                                                                | —                                             | —                                                              |
|               | 12     |                              | $\beta^-$ ( $\sim 100$ )                                                | 13,37                                         | } 4,43 (1,3)                                                   |
|               |        |                              | $\beta^- 3\alpha$ (1,5)                                                 | 0,192 (1,5)                                   |                                                                |
|               | 13     | 0,01736 (16) с               | $\beta^-$ , $\beta^- n$ (0,28)                                          | 13,44                                         |                                                                |
|               | 14     | 0,0161 (12) с                | $\beta^-$                                                               | 14,0                                          | 3,68 (7)<br>6,09; 6,73                                         |
| $^6\text{C}$  | 9      | 0,1265 (9) с                 | $p$                                                                     | 8,2 (60); 1,1 (40)                            | —                                                              |
|               | 10     | 19,42 (6) с                  | $\beta^+$                                                               | 1,87                                          | 0,511 (200, ан); 0,717 (100);<br>1,023 (1,7)                   |
|               | 11     | 20,40 (4) мин                | $\beta^+ (> 99)$                                                        | 0,97                                          | } 0,511 (200, ан.)                                             |
|               |        |                              | э. з. (0,19)                                                            | —                                             |                                                                |
|               | 12     | } Стабилен                   | 98,90 (3)                                                               | —                                             | —                                                              |
|               | 13     |                              | 1,10 (3)                                                                | —                                             | —                                                              |
|               | 14     |                              | $\beta^-$                                                               | 0,156                                         | —                                                              |
|               | 15     |                              | $\beta^-$                                                               | 9,82 (32); 4,51 (68)                          | 5,299 (68)                                                     |
|               | 16     |                              | $\beta^- n (> 98,8)$                                                    | 0,79; 1,72                                    | —                                                              |
|               | 12     |                              | $\beta^+ (\sim 100)$                                                    | 16,4                                          | 0,511 (200, ан.); 4,43 (2,4)                                   |
|               |        |                              | $3\alpha (\sim 3)$                                                      | 0,195                                         | —                                                              |
|               | 13     |                              | $\beta^+$                                                               | 1,20                                          | 0,511 (200, ан.)                                               |
| $^7\text{N}$  | 14     | 9,961 (4) мин                | 99,634 (9)                                                              | —                                             | —                                                              |
|               | 15     | } Стабилен                   | 0,366 (9)                                                               | —                                             | —                                                              |
|               | 16     |                              | $\beta^-$                                                               | 10,40 (26); 4,27 (74)                         | 2,75 (1); 6,13 (69); 7,11 (5)                                  |
|               |        |                              | $\alpha$ (0,0006)                                                       | 1,7                                           | —                                                              |
|               | 17     | 4,169 (8) с                  | $\beta^-$                                                               | 8,68(1,6); 7,81(2,6)                          | } 0,87(3); 2,19 (0,5)                                          |
|               |        |                              | $n$                                                                     | 4,1(95)                                       |                                                                |
|               | 18     | 0,63 (3) с                   | $\beta^-$                                                               | 0,40(45); 1,21(45);<br>1,81(5) 9,4            |                                                                |
|               |        |                              |                                                                         |                                               | 0,82 (59); 1,65 (59); 1,98 (100);<br>2,47 (41)                 |
|               | 13     | 0,0089 (2) с                 | $p$                                                                     | 6,40/100/; 6,97/24/                           | —                                                              |
|               | 14     | 70,599 (22) с                | $\beta^+$                                                               | 4,12 (0,6); 1,811 (99)                        | 0,511 (200, ан.); 2,312 (99)                                   |
| $^8\text{O}$  | 15     | 122,24 (16) с                | $\beta^+$                                                               | 1,74                                          | —                                                              |
|               | 16     | } Стабилен                   | 99,762 (15)                                                             | —                                             | —                                                              |
|               | 17     |                              | 0,038 (3)                                                               | —                                             | —                                                              |
|               | 18     |                              | 0,200 (12)                                                              | —                                             | —                                                              |
|               | 19     | 26,91 (8) с                  | $\beta^-$                                                               | 4,60; 3,3                                     | 0,197 (97); 1,37 (59)                                          |
|               | 20     | 13,57 (10) с                 | $\beta^-$                                                               | 2,8                                           | 1,06 (100)                                                     |
|               | 21 [2] | 3,4 с                        | $\beta^-$                                                               | 6,4                                           | 1,73; 1,79; 2,80; 3,52                                         |

| Элемент          | A    | Период полураспада | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                   |
|------------------|------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|
|                  |      |                    |                                                                         | группы частиц                                 | $\gamma$ -излучения               |
| $^9\text{F}$     | 17   | 64,50 (25) с       | $\beta^+$                                                               | 1,74                                          | 0,511 (200, ан.)                  |
|                  | 18   | 109,77 (5) мин     | $\beta^+$ (97)                                                          | 0,635                                         | } 0,511 (194, ан.)                |
|                  | 19   | Стабилен           | э. з. (3)                                                               | —                                             |                                   |
|                  | 20   | 11,03 (6) с        | 100                                                                     | —                                             | —                                 |
|                  | 21   | 4,32 (3) с         | $\beta^-$                                                               | 5,41                                          | 1,63 (100)                        |
|                  | 22   | 4,23 (4) с         | $\beta^-$                                                               | 5,7; 5,3                                      | 0,350/100/; 1,38/13/              |
| $^{10}\text{Ne}$ | 23   | 2,23 (14) с        | $\beta^-$                                                               | 11                                            | 1,28 (100); 2,08 (67); 2,17       |
|                  | 17   | 0,109 (10) с       | p                                                                       | 3,77; 4,59; 5,12                              | —                                 |
|                  | 18   | 1,67 (2) с         | $\beta^+$                                                               | 3,42                                          | 0,511 (200, ан.); 1,04 (7)        |
|                  | 19   | 17,40 (4) с        | $\beta^+$                                                               | 2,22                                          | 0,511 (200, ан.)                  |
|                  | 20   | } Стабилен         | 90,51 (9)                                                               | —                                             | —                                 |
|                  | 21   |                    | 0,27 (2)                                                                | —                                             | —                                 |
| $^{11}\text{Na}$ | 22   |                    | 9,22 (9)                                                                | —                                             | —                                 |
|                  | 23   | 37,24 (12) с       | $\beta^-$                                                               | 4,38                                          | 0,439 (33); 1,64 (0,9)            |
|                  | 24   | 3,38 (2) мин       | $\beta^-$                                                               | 1,99                                          | 0,472 (100); 0,88 (8)             |
|                  | 25   | 0,602 (8) с        | $\beta^-$                                                               | 7,3                                           | 0,090; 0,980                      |
|                  | 20   | 0,446 (3) с        | $\beta^+$                                                               | 11,4                                          | 1,63                              |
|                  |      |                    | $\beta^+\alpha$ (20)                                                    | 2,14/100/; 2,49/5/;                           | —                                 |
| $^{12}\text{Mg}$ | 21   | 22,48 (3) с        | $\beta^+$                                                               | 4,44/21/                                      | —                                 |
|                  | 22   | 2,602 (2) года     | $\beta^+$ (90,6)                                                        | 2,52                                          | 0,350 (2,3); 0,511 (200, ан.)     |
|                  | 23   | Стабилен           | э. з. (9,4)                                                             | 1,820 (0,05); 0,545                           | } 0,511 (180, ан.); 1,275 (100)   |
|                  | 24   | 15,020 (7) ч       | 100                                                                     | —                                             |                                   |
|                  |      |                    | $\beta^-$                                                               | 4,17 (0,003);                                 | 1,369 (100); 2,754 (100)          |
|                  | 24m  | 0,02018 (10)       | и. п.                                                                   | 1,389(100)                                    | —                                 |
| $^{13}\text{Al}$ | 25   | 59,6 (7) с         | $\beta^-$                                                               | 6                                             | } 0,4723                          |
|                  |      |                    | $\beta^-$                                                               | 3,83                                          |                                   |
|                  | 26   | 1,072 (9) с        | $\beta^-$                                                               | 6,7                                           | 0,39 (14); 0,58 (14); 0,98 (15);  |
|                  | 27   | 0,304 (7) с        | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (0,08)                                           | 8,0                                           | 1,61 (6)                          |
|                  | 28   | 0,0305 (4) с       | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (0,6)                                            | 13,9                                          | 1,82 (100)                        |
|                  | 21   | 0,122 (3) с        | э. з. p                                                                 | 1,77; 1,94                                    | 0,985; 1,698                      |
| $^{14}\text{Si}$ | 22   | 3,857 (9) с        | $\beta^+$                                                               | 3,2                                           | 1,47; 2,39                        |
|                  | 23   | 11,317 (11) с      | $\beta^+$                                                               | 3,03                                          | —                                 |
|                  | 24   | } Стабилен         | 78,99 (3)                                                               | —                                             | 0,58; 0,74                        |
|                  | 25   |                    | 10,00 (1)                                                               | —                                             | 0,44 (9); 0,511 (200, ан.)        |
|                  | 26   |                    | 11,01 (2)                                                               | —                                             | —                                 |
|                  | 27   | 9,462 (11) мин     | $\beta^-$                                                               | 1,75                                          | —                                 |
| $^{15}\text{P}$  | 28   | 21,07 (10) ч       | $\beta^-$                                                               | 0,9; 0,46                                     | 0,18 (0,7); 0,84 (70); 1,013 (30) |
|                  | 29   | 1,38 (13) с        | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,031 (96); 0,40 (30); 0,95 (30); |
|                  | 23   | 0,47 (3) с         | $\beta^+$ , $\beta^+p$                                                  | —                                             | 1,35 (70)                         |
|                  | 24   | 2,066 (10) с       | $\beta^+$ (100)                                                         | 8,5                                           | —                                 |
|                  |      |                    | $\alpha$ ( $\sim 10^{-2}$ )                                             | 2                                             | 0,511 (200, ан.)                  |
|                  | 24 m | 0,130 (4) с        | $\beta^+$                                                               | —                                             | —                                 |
| $^{16}\text{S}$  | 25   | 7,183 (12) с       | и. п.                                                                   | —                                             | 0,439                             |
|                  | 26   | 7,2 (3) $10^5$ лет | $\beta^+$                                                               | 3,24                                          | 0,511 (200, ан.)                  |
|                  |      |                    | $\beta^+$ (85)                                                          | 1,17                                          | 0,511 (170, ан.); 1, 12(4);       |
|                  | 26 m | 6,345 (3) с        | э. з. (15)                                                              | —                                             | 1,81 (100)                        |
|                  | 27   | Стабилен           | 100                                                                     | 3,21                                          | 0,511 (200, ан.)                  |
|                  | 28   | 2,259 (9) мин      | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                 |
| $^{17}\text{Cl}$ | 29   | 6,56 (6) мин       | $\beta^-$                                                               | 2,85                                          | 1,78 (100)                        |
|                  | 30   | 3,60 (6) с         | $\beta^-$                                                               | 2,40                                          | 1,28 (94); 2,43 (6)               |
|                  | 31   | 0,644 (25) с       | $\beta^-$                                                               | 6,3; 5,0                                      | 2,23 (61); 3,51 (39)              |
|                  | 25   | 0,220 (3) с        | $\beta^+$ , $\beta^+p$                                                  | 7,9; 5,6                                      | 1,70; 2,32                        |
|                  | 26   | 2,210 (21) с       | $\beta^+$                                                               | —                                             | —                                 |
|                  | 27   | 4,17 (1) с         | $\beta^+$                                                               | 3,83                                          | 0,511 (200, ан.); 0,82 (34); 1,62 |
|                  |      |                    |                                                                         | 3,85                                          | 0,511 (200, ан.)                  |

| Элемент          | A   | Период полураспада             | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                      |
|------------------|-----|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                  |     |                                |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                          |
| <sup>15</sup> P  | 28  | Стабилен                       | 92,23 (1)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 29  |                                | 4,67 (1)                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 30  |                                | 3,10 (1)                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 31  |                                | β <sup>-</sup>                                                          | 1,48                                          | 1,26 (0,07)                                          |
|                  | 32  | 157,3 (3) мин                  | β <sup>-</sup>                                                          | 0,21                                          | —                                                    |
|                  | 32  | 330(40) лет                    | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | —                                                    |
|                  | 28  | 0,2703 (5) с                   | β <sup>+</sup>                                                          | 11,0                                          | } 0,511 (200, ан.), 1,78 (75);<br>4,44 (10); 7,6 (5) |
|                  | 28  | —                              | β <sup>+</sup> α                                                        | 1,43; 2,10                                    |                                                      |
|                  | 29  | 4,142 (15) с                   | β <sup>+</sup>                                                          | 3,95                                          |                                                      |
|                  | 29  | —                              | β <sup>+</sup>                                                          | —                                             |                                                      |
| <sup>16</sup> S  | 30  | 2,498 (4) мин                  | β <sup>+</sup>                                                          | 3,24                                          | } 0,511 (200, ан.); 2,23 (0,5)                       |
|                  | 31  | Стабилен                       | 100                                                                     | —                                             |                                                      |
|                  | 32  | 14,36 (4) сут                  | β <sup>-</sup>                                                          | 1,710                                         |                                                      |
|                  | 33  | 25,34 (12) сут                 | β <sup>-</sup>                                                          | 0,248                                         |                                                      |
|                  | 34  | 12,40 (12) с                   | β <sup>-</sup>                                                          | 5,4                                           | 2,13 (25); 4,0 (0,2)                                 |
|                  | 35  | 47,3 (7) с                     | β <sup>-</sup>                                                          | 2,3                                           |                                                      |
|                  | 29  | 0,187 (4) с                    | β <sup>+</sup> , β <sup>+</sup> p                                       | —                                             | —                                                    |
|                  | 30  | 1,24 (4) с                     | β <sup>+</sup>                                                          | 5,09 (20); 4,42 (80)                          | 0,511 (200, ан.); 0,687 (80)                         |
|                  | 31  | 2,584 (18) с                   | β <sup>+</sup>                                                          | 4,42                                          | 0,511 (200, ан.); 1,27 (1,1)                         |
|                  | 32  | Стабилен                       | 95,02 (9)                                                               | —                                             | —                                                    |
| <sup>17</sup> Cl | 33  |                                | 0,75 (1)                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 34  |                                | 4,21 (8)                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 35  |                                | β <sup>-</sup>                                                          | 0,167                                         | —                                                    |
|                  | 36  | 87,24 (17) сут                 | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | —                                                    |
|                  | 37  | Стабилен                       | 0,02 (1)                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 37  | 5,06 (1) мин                   | β <sup>-</sup>                                                          | 4,7 (10); 1,6 (90)                            | 3,09 (90)                                            |
|                  | 38  | 170,3 (7) мин                  | β <sup>-</sup>                                                          | 3,0 (5); 1,1                                  | 1,88 (95)                                            |
|                  | 32  | 0,298 (2) с                    | β <sup>+</sup>                                                          | 11,7; 9,9;                                    | 0,511 (200, ан.); 2,24 (70);<br>4,29 (7); 4,77 (14)  |
|                  | 33  | 2,50 (2) с                     | β <sup>+</sup> α (0,01)                                                 | 2,20                                          | —                                                    |
|                  | 34  | 1,529 (4) с                    | β <sup>+</sup>                                                          | 4,55                                          | 0,511 (200, ан.); 2,9 (0,3)                          |
| <sup>18</sup> Ar | 35  | Стабилен                       | 75,77 (5)                                                               | —                                             | 0,511 (200, ан.)                                     |
|                  | 36  | 3,01 (2) · 10 <sup>5</sup> лет | β <sup>-</sup> (98,1)                                                   | 0,714                                         | } 0,511 (0,003, ан.)                                 |
|                  | 36  | —                              | э. з. (1,9)                                                             | —                                             |                                                      |
|                  | 36  | —                              | β <sup>+</sup> (0,0012)                                                 | —                                             |                                                      |
|                  | 37  | Стабилен                       | 24,23 (5)                                                               | —                                             |                                                      |
|                  | 38  | 37,24 (5) мин                  | β <sup>-</sup>                                                          | 4,91                                          | 1,60 (38); 2,17 (47)                                 |
|                  | 38m | 0,716 (3) с                    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,671 (100)                                          |
|                  | 39  | 55,6 (2) мин                   | β <sup>-</sup>                                                          | 3,45 (7); 2,18 (8);<br>1,91                   | 0,246 (44); 1,27 (50); 1,52 (42)                     |
|                  | 40  | 1,35 (2) мин                   | β <sup>-</sup>                                                          | 7,5                                           | 1,46/100/; 2,83/100/; 3,10; 5,8                      |
|                  | 33  | 0,18 с                         | β <sup>+</sup> , β <sup>+</sup> p (34)                                  | —                                             | 0,81                                                 |
| <sup>19</sup> K  | 34  | 0,841 (10) с                   | β <sup>+</sup>                                                          | 5,0                                           | 0,67; 3,13                                           |
|                  | 35  | 1,781 (9) с                    | β <sup>+</sup>                                                          | 4,94                                          | 0,511 (200, ан.) 1,22 (5);<br>1,76 (22)              |
|                  | 36  | Стабилен                       | 0,337 (3)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 37  | 34,8 (2) сут                   | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                    |
|                  | 38  | Стабилен                       | 0,063 (1)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 39  | 269 (3) лет                    | β <sup>-</sup>                                                          | 0,565                                         | —                                                    |
|                  | 40  | Стабилен                       | 99,600 (3)                                                              | —                                             | —                                                    |
|                  | 41  | 109,6 (4) мин                  | β <sup>-</sup>                                                          | 2,49 (0,8); 1,198                             | 1,293 (99)                                           |
|                  | 42  | 32,9 (11) года                 | β <sup>-</sup>                                                          | ~0,6                                          | —                                                    |
|                  | 43  | 5,37 (6) мин                   | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | 0,74; 0,98; 1,44                                     |
| <sup>20</sup> Ca | 44  | 11,87 (5) мин                  | —                                                                       | —                                             | 0,18; 1,70; 1,89                                     |
|                  | 45  | 21,48 (15) с                   | β <sup>-</sup>                                                          | 5,8; 3,2                                      | 1,02; 3,71                                           |
|                  | 46  | 8 (1) с                        | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | 1,94                                                 |
|                  | 36  | 0,340 (3) с                    | β <sup>+</sup>                                                          | 9,9                                           | 1,97; 2,21 2,43                                      |
|                  | 37  | 1,23 (2) с                     | β <sup>+</sup>                                                          | 5,14                                          | 0,511 (200, ан.); 2,79 (2)                           |
|                  | 38  | 7,636 (18) мин                 | β <sup>+</sup>                                                          | 2,68                                          | 0,511 (200, ан.); 2,17 (100)                         |
|                  | 38m | 0,929 (3) с                    | β <sup>+</sup>                                                          | 5,0                                           | 0,511 (200, ан.)                                     |
|                  | 39  | Стабилен                       | 93,2581 (30)                                                            | —                                             | —                                                    |

| Элемент          | A   | Период полураспада              | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %                  | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)                |                                   |
|------------------|-----|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                  |     |                                 |                                                                                          | групп частиц                                                 | γ-излучения                       |
| $^{20}\text{Ca}$ | 40  | 1,277 (8) · 10 <sup>6</sup> лет | 0,0117 (1)<br>β <sup>-</sup> (89)<br>э. з. (11)<br>β <sup>+</sup> (0,001)<br>6,7302 (30) | —<br>1,314<br>—<br>0,483<br>—                                | —<br>—<br>—<br>—<br>—             |
|                  | 41  | Стабилен                        | β <sup>-</sup>                                                                           | 3,52                                                         | 0,31 (0,2); 1,524 (18)            |
|                  | 42  | 12,360 (3) ч                    | β <sup>-</sup>                                                                           | 1,82 (1); 1,2 (3);                                           | 0,373 (85); 0,39*(18); 0,59 (13); |
|                  | 43  | 22,3 (1) ч                      | β <sup>-</sup>                                                                           | 0,83                                                         | 0,619 (81)                        |
|                  | 44  | 22,13 (19) мин                  | β <sup>-</sup>                                                                           | 5,2                                                          | 1,156 (61); 1,74 (8); 2,1**(37);  |
|                  | 45  | 17,3 (6) мин                    | β <sup>-</sup>                                                                           | 4,2; 2,3                                                     | 2,6 (7)                           |
|                  | 46  | 107 (10) с                      | β <sup>-</sup>                                                                           | 6,4                                                          | 0,17; 1,71                        |
|                  | 47  | 17,5 (3) с                      | β <sup>-</sup>                                                                           | 6,1 (1); 4,1                                                 | 1,35; 3,70                        |
|                  | 48  | 6,9 (2) с                       | β <sup>-</sup>                                                                           | —                                                            | 2,0 (84); 2,6 (15)                |
|                  | 37  | 0,175 (3) с                     | β <sup>+</sup> p                                                                         | 3,10                                                         | —                                 |
|                  | 38  | 0,447 (10) с                    | β <sup>+</sup>                                                                           | 5,6                                                          | 1,57                              |
|                  | 39  | 0,876 с                         | β <sup>+</sup>                                                                           | 5,49                                                         | 0,511 (ан.)                       |
|                  | 40  | Стабилен                        | 96,941 (13)                                                                              | —                                                            | —                                 |
|                  | 41  | 1,4 (2) · 10 <sup>5</sup> лет   | э. з.                                                                                    | —                                                            | —                                 |
|                  | 42  | } Стабилен                      | 0,647 (3)                                                                                | —                                                            | —                                 |
|                  | 43  |                                 | 0,135 (3)                                                                                | —                                                            | —                                 |
|                  | 44  |                                 | 2,086 (5)                                                                                | —                                                            | —                                 |
|                  | 45  |                                 | β <sup>-</sup>                                                                           | —                                                            | —                                 |
|                  | 46  | 163,8 (18) сут                  | β <sup>-</sup>                                                                           | 0,252                                                        | —                                 |
|                  | 47  | Стабилен                        | 0,004 (3)                                                                                | —                                                            | —                                 |
|                  | 48  | 4,536 (2) сут                   | β <sup>-</sup>                                                                           | 1,98 (18); 0,67                                              | 0,49 (5); 0,815 (5); 1,308 (74)   |
|                  | 49  | > 2 · 10 <sup>18</sup> лет      | 0,187 (3)                                                                                | —                                                            | —                                 |
|                  | 50  | 8,716 (11) мин                  | β <sup>-</sup>                                                                           | 1,95                                                         | 3,10 (89); 4,1 (10)               |
|                  | 50  | 13,9 (6) с                      | β <sup>-</sup>                                                                           | 3,1                                                          | 0,072; 0,257; 1,52; 1,59          |
| $^{21}\text{Sc}$ | 40  | 0,1823 (7) с                    | β <sup>+</sup> , β <sup>+</sup> p                                                        | 9,1                                                          | 0,511 (200, ан.); 3,75            |
|                  | 41  | 0,601 (12) с                    | β <sup>+</sup>                                                                           | 5,47                                                         | —                                 |
|                  | 42  | 0,6839 (9) с                    | э. з.                                                                                    | —                                                            | 0,511 (200, ан.)                  |
|                  | 42m | 61,3 (7) с                      | β <sup>+</sup>                                                                           | 2,82                                                         | 0,438 (100); 0,511 (200, ан.);    |
|                  | 43  | 3,891 (12) ч                    | β <sup>+</sup>                                                                           | 1,20                                                         | 1,22 (100); 1,52 (100);           |
|                  | 43m | 0,632 (8) с                     | и. п.                                                                                    | —                                                            | 0,375 (22); 0,511 (180, ан.)      |
|                  | 44  | 3,927 (8) ч                     | β <sup>+</sup>                                                                           | 1,47                                                         | —                                 |
|                  | 44m | 58,6 (1) ч                      | э. з. (5)                                                                                | —                                                            | } 0,511 (188, ан.); 1,159 (100)   |
|                  | 45  | Стабилен                        | β <sup>+</sup> (1,39)                                                                    | —                                                            | } 0,271 (86); 1,02 (1,3)          |
|                  | 45m | 0,316 (9) с                     | и. п. (98,61)                                                                            | —                                                            |                                   |
|                  | 46  | 83,83 (2) сут                   | и. п.                                                                                    | —                                                            | —                                 |
|                  | 46m | 18,70 (5) с                     | β <sup>-</sup>                                                                           | 1,48 (0,004); 0,357                                          | 0,0124                            |
|                  | 47  | 3,35 (2) сут                    | β <sup>-</sup>                                                                           | —                                                            | 0,889 (100); 1,120 (100)          |
|                  | 48  | 43,7 (1) ч                      | и. п.                                                                                    | —                                                            | 0,142                             |
|                  | 49  | 57,4 (1) мин                    | β <sup>-</sup>                                                                           | 0,600                                                        | 0,160 (73)                        |
|                  | 50  | 1,708 (9) мин                   | β <sup>-</sup>                                                                           | 0,65                                                         | 0,175 (6); 0,983 (100);           |
|                  | 50m | 0,35 (1) с                      | β <sup>-</sup>                                                                           | 2,01                                                         | 1,040 (100); 1,814 (100)          |
|                  | 51  | 12,4 (1) с                      | β <sup>-</sup>                                                                           | 4,2; 3,6                                                     | 1,76 (0,03)                       |
|                  | 51  | 0,35 (1) с                      | и. п.                                                                                    | —                                                            | 0,520 (100); 1,12 (100);          |
|                  | 51  | 12,4 (1) с                      | β <sup>-</sup>                                                                           | 5,0; 4,3                                                     | 1,55 (100)                        |
|                  | 51  | 12,4 (1) с                      | β <sup>-</sup>                                                                           | —                                                            | 0,257                             |
| $^{22}\text{Ti}$ | 41  | 0,088 (1) с                     | β <sup>+</sup> p                                                                         | 2,3/8/; 3,05/17/;<br>3,68/16/; 4,12/4/;<br>4,64/50/; 5,30/5/ | —                                 |
|                  | 42  | 0,199 (6) с                     | β <sup>+</sup>                                                                           | 6,0; 5,4                                                     | 0,611                             |
|                  | 43  | 0,490 (20) с                    | β <sup>+</sup>                                                                           | 5,8                                                          | —                                 |
|                  | 44  | 47,3 (12) года                  | э. з.                                                                                    | —                                                            | 0,068 (90); 0,078 (98)            |
|                  | 45  | 184,8 (5) мин                   | β <sup>+</sup>                                                                           | 1,04                                                         | 0,718 (0,4); 1,408 (0,3)          |

| Эле-<br>мент     | A   | Период полураспада          | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                            |
|------------------|-----|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                  |     |                             |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                |
| <sup>23</sup> V  | 46  | } Стабилен                  | 8,0 (1)                                                                              | —                                             | —                                                          |
|                  | 47  |                             | 7,3 (1)                                                                              | —                                             | —                                                          |
|                  | 48  |                             | 73,8 (1)                                                                             | —                                             | —                                                          |
|                  | 49  |                             | 5,5 (1)                                                                              | —                                             | —                                                          |
|                  | 50  |                             | 5,4 (1)                                                                              | —                                             | —                                                          |
|                  | 51  | 5,76 (1) мин                | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,14                                          | 0,320 (95); 0,605 (1,5);<br>0,928 (5)                      |
|                  | 52  | 1,7 (1) мин                 | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                          |
|                  | 53  | 32,7 (9) с                  | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,8; 3,1                                      | 0,101; 0,128; 0,228; 1,676                                 |
|                  | 45  | 0,539 (18) с                | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | —                                                          |
|                  | 46  | 0,4223 (2) с                | β <sup>+</sup>                                                                       | 6,03                                          | 0,511 (200, ан.)                                           |
|                  | 46m | 0,001 (1) с                 | и. п.                                                                                | —                                             | 0,801                                                      |
|                  | 47  | 32,6 (3) мин                | β <sup>+</sup>                                                                       | 1,89                                          | 1,80 (0,5)                                                 |
|                  | 48  | 15,97 (4) сут               | β <sup>+</sup> (49)                                                                  | 0,696                                         | } 0,511 (100, ан.); 0,945 (10);<br>0,983 (100); 1,312 (97) |
|                  | 49  | 330 (15) сут                | э. з. (51)                                                                           | —                                             |                                                            |
|                  | 50  | > 4·10 <sup>16</sup> лет    | э. з. (70)                                                                           | —                                             | } 0,783 (30); 1,55 (70)                                    |
|                  |     |                             | β <sup>-</sup> (30)                                                                  | —                                             |                                                            |
|                  |     |                             | 99,750 (2)                                                                           | —                                             |                                                            |
|                  | 51  | Стабилен                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,47                                          | 1,434 (100)                                                |
|                  | 52  | 3,75 (1) мин                | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,50                                          | 1,006; 1,289                                               |
|                  | 53  | 1,61 (4) мин                | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,3                                           | 0,84 (100); 0,99 (100);<br>2,21 (100)                      |
| <sup>24</sup> Cr | 45  | 0,050 (5) с                 | β <sup>+</sup> p                                                                     | —                                             | —                                                          |
|                  | 46  | 0,26 (6) с                  | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | —                                                          |
|                  | 47  | 0,460 (15) с                | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | —                                                          |
|                  | 48  | 22,96 (3) ч                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,116 (98); 0,31 (99)                                      |
|                  | 49  | 42,09 (15) мин              | β <sup>+</sup>                                                                       | 1,54                                          | 0,063 (14); 0,091 (28) 0,153 (13)                          |
|                  | 50  | Стабилен                    | 4,345 (9)                                                                            | —                                             | —                                                          |
|                  | 51  | 27,704 (4) сут              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,320 (10)                                                 |
|                  | 52  | } Стабилен                  | 83,789 (12)                                                                          | —                                             | —                                                          |
|                  | 53  |                             | 9,501 (11)                                                                           | —                                             | —                                                          |
|                  | 54  |                             | 2,365 (5)                                                                            | —                                             | —                                                          |
|                  | 55  | 3,55 (3) мин                | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,59                                          | —                                                          |
|                  | 56  | 5,94 (10) мин               | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,5                                           | 0,026; 0,083                                               |
| <sup>25</sup> Mn | 50  | 0,2832 (6) с                | β <sup>+</sup>                                                                       | 6,61                                          | —                                                          |
|                  | 50m | 1,75 (3) мин                | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | 0,227                                                      |
|                  | 51  | 46,2 (1) мин                | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,17                                          | —                                                          |
|                  | 52  | 5,591 (3) сут               | э. з. (66)                                                                           | —                                             | } 0,511 (67, ан.); 0,744 (82);<br>0,935 (84); 1,434 (100)  |
|                  |     |                             | β <sup>+</sup> (34)                                                                  | 0,575                                         |                                                            |
|                  |     |                             | β <sup>+</sup> (98)                                                                  | 1,63                                          |                                                            |
|                  | 52m | 21,1 (2) мин                | и. п. (2)                                                                            | —                                             | 0,511 (193, ан.); 1,434 (100)<br>0,378                     |
|                  | 53  | 3,7 (4)·10 <sup>6</sup> лет | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                          |
|                  | 54  | 312,5 (5) сут               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,835 (100)                                                |
|                  | 55  | Стабилен                    | 100                                                                                  | —                                             | —                                                          |
|                  | 56  | 2,5785 (6) ч                | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,85                                          | 0,847 (99); 1,811 (29); 2,110 (15)                         |
| <sup>26</sup> Fe | 57  | 1,61 (5) мин                | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,55                                          | 0,044; 0,122; 0,692                                        |
|                  | 58  | 65,3 (7) с                  | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                          |
|                  | 59  | 4,6 (1) с                   | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,8; 4,4                                      | 0,473; 0,571; 0,726                                        |
|                  | 60  | 1,79 (10) с                 | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                          |
|                  | 49  | 0,075 (10) с                | β <sup>+</sup> p                                                                     | —                                             | —                                                          |
|                  | 51  | 0,270 (6) с                 | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | —                                                          |
|                  | 52  | 8,275 (8) ч                 | β <sup>+</sup> (56)                                                                  | 0,80                                          | 0,165 (100); 0,511 (112, ан.)                              |
|                  |     |                             | э. з. (44)                                                                           | —                                             | —                                                          |
|                  | 52m | 46 (2) с                    | э. з., и. п.                                                                         | —                                             | —                                                          |
|                  | 53  | 8,51 (2) мин                | β <sup>+</sup>                                                                       | 3,0                                           | 0,38 (32); 0,511 (196, ан.)                                |
|                  | 53m | 2,58 (6) мин                | и. п.                                                                                | —                                             | 3,041                                                      |
|                  | 54  | Стабилен                    | 5,8 (1)                                                                              | —                                             | —                                                          |
|                  | 55  | 2,7 года                    | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                          |

| Элемент          | A   | Период полураспада           | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                                                                                    |
|------------------|-----|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |     |                              |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                                                                                        |
| <sup>27</sup> Co | 56  | Стабилен                     | 91,72 (30)                                                              | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 57  |                              | 2,2 (1)                                                                 | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 58  |                              | 0,28 (1)                                                                | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 59  | 44,496 (7) сут               | β <sup>-</sup>                                                          | 1,57 (0,3); 0,475                             | 0,192 (2,8); 1,095 (56); 1,292 (44)                                                                                                                |
|                  | 60  | ~ 3·10 <sup>5</sup> лет      | β <sup>-</sup>                                                          | 0,1                                           | —                                                                                                                                                  |
|                  | 61  | 5,98 (6) мин                 | β <sup>-</sup>                                                          | 2,8                                           | 0,13/11/; 0,30/48/; 1,03/98/; 1,20/100/ 0,506                                                                                                      |
|                  | 62  | 68 (2) с                     | β <sup>-</sup>                                                          | 2,5                                           | —                                                                                                                                                  |
|                  | 54  | 0,19323 (14) с               | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 54m | 1,48 (2) мин                 | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 55  | 17,54 (4) ч                  | β <sup>+</sup> (81)                                                     | 1,50                                          | 0,198                                                                                                                                              |
|                  | 56  | 78,76 (12) сут               | э. з. (19)                                                              | —                                             | 0,480 (12); 0,511 (160, ан.); 0,930 (80); 1,41 (13) 0,511 (40, ан.); 0,847 (100); 1,04 (15); 1,24 (66); 1,77 (15); 2,02 (11); 2,60 (17); 3,26 (13) |
|                  |     |                              | э. з. (80)                                                              | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  |     |                              | β <sup>+</sup> (20)                                                     | 1,49                                          |                                                                                                                                                    |
|                  | 57  | 270,9 (6) сут                | э. з.                                                                   | —                                             | 0,014 (10); 0,122 (86); 0,136 (11)                                                                                                                 |
|                  | 58  | 70,78 (10) сут               | э. з. (85)                                                              | —                                             | 0,511 (30, ан.); 0,810 (99); 0,865 (1,4) 0,0249                                                                                                    |
|                  | 58m | 9,15 (10) ч                  | β <sup>+</sup> (15)                                                     | 0,474                                         |                                                                                                                                                    |
|                  | 59  | Стабилен                     | и. п.                                                                   | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  | 60  | 5,271 (1) года               | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 60m | 10,47 (4) мин                | и. п. (> 99)                                                            | 1,48 (0,12); 0,314 (99)                       | 1,173 (100); 1,332 (100)                                                                                                                           |
| <sup>28</sup> Ni | 61  | 1,650 (5) ч                  | β <sup>-</sup> (0,25)                                                   | 1,55                                          | 0,059 (2,1); 1,33 (0,25)                                                                                                                           |
|                  | 62  | 1,50 (4) мин                 | β <sup>-</sup>                                                          | 1,22                                          |                                                                                                                                                    |
|                  | 62m | 13,91 (5) мин                | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | 0,067 (89)                                                                                                                                         |
|                  | 63  | 27,4 (5) с                   | и. п.                                                                   | —                                             | 1,17** (180); 1,47 (20); 1,74 (19); 2,03 (7)                                                                                                       |
|                  |     |                              | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  |     |                              | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  | 64  | 0,30 (3) с                   | β <sup>-</sup>                                                          | 3,6                                           | 0,087; 0,982                                                                                                                                       |
|                  | 56  | 6,10 (2) сут                 | э. з.                                                                   | 7,0                                           | 0,931; 1,346 0,163 (99); 0,276 (31); 0,472 (35); 0,748 (48); 0,812 (85) 1,56 (14)                                                                  |
|                  |     |                              |                                                                         | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  |     |                              |                                                                         | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  | 57  | 36,08 (9) ч                  | э. з. (54)                                                              | —                                             | 0,127 (14); 0,511 (92, ан.); 1,37 (86); 1,89 (14)                                                                                                  |
|                  | 58  | Стабилен                     | β <sup>+</sup> (46)                                                     | 0,85                                          |                                                                                                                                                    |
|                  | 59  | 7,5 (13)·10 <sup>4</sup> лет | 68,27 (1)                                                               | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 60  | Стабилен                     | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 61  |                              | 26,10 (1)                                                               | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 62  |                              | 1,13 (1)                                                                | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 63  | 100,1 (20) года              | 3,59 (1)                                                                | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 64  |                              | β <sup>+</sup>                                                          | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 65  |                              | 0,91 (1)                                                                | 0,067                                         | —                                                                                                                                                  |
|                  | 66  | 2,520 (2) ч                  | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | —                                                                                                                                                  |
|                  | 67  | 54,6 (4) ч                   | β <sup>-</sup>                                                          | 2,13                                          | 1,115 (16); 1,481 (25)                                                                                                                             |
|                  | 68  | 21 (1) с                     | β <sup>-</sup>                                                          | 0,20                                          | —                                                                                                                                                  |
| <sup>28</sup> Cu | 58  | 3,204 (7) с                  | β <sup>+</sup>                                                          | 4,1                                           | 0,90* (51); 1,26 (15)                                                                                                                              |
|                  | 59  | 81,5 (5) с                   | β <sup>+</sup>                                                          | 7,5                                           | 1,45                                                                                                                                               |
|                  | 60  | 23,2 (3) мин                 | β <sup>+</sup> (93)                                                     | 3,7                                           | 0,511 (197, ан.); 0,879 (9); 1,305 (11)                                                                                                            |
|                  |     |                              |                                                                         | 3,92 (6); 3,00 (18); 2,00                     |                                                                                                                                                    |
|                  |     |                              |                                                                         | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  | 61  | 3,408 (10) ч                 | э. з. (7)                                                               | —                                             | 0,511 (186, ан.); 0,85 (15); 1,332 (80); 1,76 (52)                                                                                                 |
|                  |     |                              | β <sup>+</sup> (60)                                                     | 1,22                                          |                                                                                                                                                    |
|                  |     |                              | э. з. (40)                                                              | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  | 62  | 9,74 (2) мин                 | β <sup>+</sup>                                                          | —                                             | 0,067 (4); 0,284 (12); 0,38 (3); 0,511 (120, ан.); 1,19 (5)                                                                                        |
|                  | 63  | Стабилен                     | 69,17 (2)                                                               | 2,91                                          | 0,511 (195, ан.); 0,88 (0,3)                                                                                                                       |
|                  | 64  | 12,701 (2) ч                 | э. з. (43)                                                              | —                                             |                                                                                                                                                    |
|                  | 65  | Стабилен                     | β <sup>-</sup> (38)                                                     | —                                             | 0,511 (38, ан.); 1,34 (0,5)                                                                                                                        |
|                  |     |                              | β <sup>+</sup> (19)                                                     | 0,573                                         |                                                                                                                                                    |
|                  |     |                              | 30,83 (2)                                                               | 0,656                                         |                                                                                                                                                    |

| Элемент          | A   | Период полураспада | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                          |
|------------------|-----|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                  |     |                    |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                                              |
| $^{30}\text{Zn}$ | 66  | 5,10 (2) мин       | $\beta^-$                                                               | 2,63                                          | 1,039 (9)                                                                |
|                  | 67  | 61,92 (9) ч        | $\beta^-$                                                               | 0,57                                          | 0,092* (23); 0,184 (40)                                                  |
|                  | 68  | 31 (1) с           | $\beta^-$                                                               | 3,5                                           | 0,80 (17); 1,078 (95)                                                    |
|                  | 68m | 3,75 (5) мин       | и. п. (86)                                                              | —                                             | —                                                                        |
|                  |     |                    | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                                                        |
|                  | 69  | 3,0 (1) мин        | $\beta^-$                                                               | 2,5                                           | 0,531; 0,834; 1,007                                                      |
|                  | 70  | 4,5 (10) с         | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                                                        |
|                  | 57  | 0,040 (10) с       | $\beta^+p$                                                              | 1,92; 2,53; 4,57                              | —                                                                        |
|                  | 59  | 0,1837 (23) с      | э. з.                                                                   | —                                             | 0,491; 0,914                                                             |
|                  | 60  | 2,38 (5) мин       | $\beta^+$                                                               | 3,1; 2,5                                      | 0,061; 0,273; 0,334; 0,670                                               |
|                  | 61  | 89,1 (2) с         | $\beta^+$                                                               | 4,4                                           | 0,48 (11); 0,511 (198, ан.); 0,98 (3); 1,64 (6)                          |
|                  | 62  | 9,26 (2) ч         | э. з. (82)                                                              | —                                             | 0,042 (20); 0,51** (47);                                                 |
|                  |     |                    | $\beta^+$ (18)                                                          | 0,66                                          | 0,59 (22)                                                                |
|                  | 63  | 38,1 (3) мин       | $\beta^+$ (93)                                                          | 2,34                                          | 0,511 (186, ан.); 0,669 (8);                                             |
|                  |     |                    | э. з. (7)                                                               | —                                             | 0,962 (6)                                                                |
|                  | 64  | Стабилен           | 48,6 (3)                                                                | —                                             | —                                                                        |
|                  | 65  | 244,1 (2) сут      | э. з. (98,3)                                                            | —                                             | 0,511 (3,4, ан.); 1,115 (49)                                             |
|                  |     |                    | $\beta^+$ (1,7)                                                         | —                                             | —                                                                        |
|                  | 66  | } Стабилен         | 27,9 (2)                                                                | 0,327                                         | —                                                                        |
|                  | 67  |                    | 4,1 (1)                                                                 | —                                             | —                                                                        |
|                  | 68  |                    | 18,8 (4)                                                                | —                                             | —                                                                        |
|                  | 69  |                    | —                                                                       | —                                             | —                                                                        |
|                  | 69m | 55,6 (16) мин      | $\beta^-$                                                               | 0,90                                          | —                                                                        |
|                  |     | 13,76 (2) ч        | и. п. (> 99),                                                           | —                                             | 0,439 (95)                                                               |
|                  |     |                    | $\beta^-$ (0,033)                                                       | —                                             | —                                                                        |
|                  | 70  | Стабилен           | 0,6 (1)                                                                 | —                                             | —                                                                        |
|                  | 71  | 2,45 (10) мин      | $\beta^-$                                                               | 2,61                                          | 0,39 (1,3); 0,510 (13); 0,92 (3); 1,12 (153)                             |
|                  | 71m | 3,94 (5) ч         | $\beta^-$                                                               | 1,46                                          | 0,13 (9); 0,385 (94); 0,495 (75); 0,609 (95); 0,76 (5); 0,99 (8)         |
|                  | 72  | 46,5 (1) ч         | $\beta^-$                                                               | 0,30                                          | 0,015 (8); 0,145 (90); 0,192 (10);                                       |
|                  | 73  | 23,5 (10) с        | $\beta^-$                                                               | 4,7                                           | 0,216; 0,496; 0,911                                                      |
|                  | 74  | 95 (1) с           | $\beta^-$                                                               | 2,3; 2,1                                      | 0,057; 0,14; 0,19                                                        |
|                  | 75  | 10,2 (3) с         | $\beta^-$                                                               | 5,6                                           | —                                                                        |
|                  | 76  | 5,7 (3) с          | $\beta^-$                                                               | 3,7                                           | 0,08—1,03                                                                |
|                  | 77  | 1,4 (3) с          | $\beta^-$                                                               | 4,8                                           | 0,189; 0,473                                                             |
|                  | 78  | 1,47 (15) с        | $\beta^-$                                                               | 5,1                                           | 0,182; 0,225; 0,454; 0,636; 0,860                                        |
| $^{31}\text{Ga}$ | 79  | 2,63 (9) с         | $\beta^-n$                                                              | —                                             | —                                                                        |
|                  | 62  | 0,1161 (3) с       | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                        |
|                  | 63  | 32,4 (5) с         | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                        |
|                  | 64  | 2,630 (11) мин     | $\beta^+$                                                               | 6,05 (33); 2,8                                | 0,511 (196, ан.); 0,80 (15); 0,992 (43); 1,38 (14); 2,18 (11); 3,32 (18) |
|                  | 65  | 15,2 (2) мин       | $\beta^+$ (> 50)                                                        | 2,24 (12); 2,11                               | 0,061 (12); 0,115 (55); 0,152 (10);                                      |
|                  |     |                    | э. з. (< 50)                                                            | —                                             | 0,511 (180, ан.); 0,75 (10)                                              |
|                  | 66  | 9,49 (8) ч         | $\beta^+$ (57)                                                          | 4,153                                         | 0,511 (114, ан.); 1,039 (37);                                            |
|                  |     |                    | э. з. (43)                                                              | —                                             | 2,183 (5); 2,748 (25); 4,30 (5)                                          |
|                  | 67  | 3,261 (1) сут      | э. з.                                                                   | —                                             | 0,388 (7)                                                                |
|                  | 68  | 68,1 (3) мин       | $\beta^+$ (88)                                                          | 1,90                                          | 0,511 (176, ан.); 1,078 (3,5)                                            |
|                  |     |                    | э. з. (12)                                                              | —                                             | —                                                                        |
|                  | 69  | Стабилен           | 60,1 (2)                                                                | —                                             | —                                                                        |
|                  | 70  | 21,15 (5) мин      | $\beta^-$ (99,8)                                                        | 1,65                                          | 0,173 (0,16); 1,040 (0,5)                                                |
|                  | 71  | Стабилен           | 39,9 (2)                                                                | —                                             | —                                                                        |
|                  | 72  | 14,10 (2) ч        | $\beta^-$                                                               | 3,15                                          | 0,630 (27); 0,835 (96); 2,201 (26); 2,50* (20)                           |
|                  | 73  | 4,87 (3) ч         | $\beta^-$                                                               | 1,19                                          | 0,054 (9); 0,295 (94); 0,74 (6);                                         |
|                  | 74  | 8,1 (1) мин        | $\beta^-$                                                               | 2,5                                           | 0,60* (100); 0,87* (9); 2,35 (45)                                        |
|                  | 74m | 9,5 (10) с         | и. п.                                                                   | —                                             | 0,0597                                                                   |
|                  | 75  | 2,10 (3) мин       | $\beta^-$                                                               | 3,3                                           | 0,58 (3)                                                                 |
|                  | 76  | 27,1 (2) с         | $\beta^-$                                                               | 6                                             | 0,546; 0,563; 1,108                                                      |

| Элемент          | A   | Период полураспада | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                                  |
|------------------|-----|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |     |                    |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                                      |
| <sup>32</sup> Ge | 77  | 13,2 (2) с         | β <sup>-</sup>                                                          | 5,2                                           | 0,459; 0,469                                                                                     |
|                  | 78  | 5,09 (5) с         | β <sup>-</sup>                                                          | 7,5; 5,1                                      | 0,567; 0,619; 1,186                                                                              |
|                  | 79  | 3,00 (9) с         | β <sup>-</sup>                                                          | 6,6                                           | 0,09—2,51                                                                                        |
|                  | 80  | 1,66 (2) с         | β <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> n                                       | —                                             | 1,11                                                                                             |
|                  | 61  | 0,040 (15) с       | —                                                                       | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 64  | 63,7 (25) с        | β <sup>+</sup>                                                          | 3,3; 3,0                                      | 0,128; 0,427; 0,667                                                                              |
|                  | 65  | 30,9 (7) с         | β <sup>+</sup>                                                          | 5,2; 4,6                                      | 0,511 (197, ан.); 0,67 (3); 1,72 (2)                                                             |
|                  | 66  | 2,26 (5) ч         | β <sup>+</sup> (62)<br>э. з. (38)                                       | 1,1; 0,7<br>—                                 | 0,046 (37); 0,114 (22); 0,185 (23); 0,27 (19); 0,34 (19); 0,38 (48); 0,47 (19); 0,511 (124, ан.) |
|                  | 67  | 18,7 (5) мин       | β <sup>+</sup>                                                          | 3,2; 3,0                                      | 0,170* (105); 0,511 (170, ан.); 1,473                                                            |
|                  | 68  | 287 (6) сут        | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 69  | 39,05 (10) ч       | э. з. (67)<br>β <sup>+</sup> (33)                                       | —<br>1,22                                     | 0,511 (68, ан.); 0,573 (13); 0,872 (10); 1,107 (28)                                              |
|                  | 70  | Стабилен           | 20,5 (5)                                                                | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 71  | 11,8 (4) сут       | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 71m | 0,0202 (5) с       | и. п.                                                                   | —                                             | 0,198                                                                                            |
|                  | 72  | } Стабилен         | 27,4 (6)                                                                | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 73  |                    | 7,8 (2)                                                                 | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 73m | 0,499 (11) с       | и. п.                                                                   | —                                             | 0,0666                                                                                           |
|                  | 74  | Стабилен           | 36,5 (7)                                                                | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 75  | 82,78 (4) мин      | β <sup>-</sup>                                                          | 1,19                                          | 0,199 (1,4); 0,265 (11)                                                                          |
|                  | 75m | 47,7 (7) с         | и. п. (99,97),<br>β <sup>-</sup> (0,03)                                 | —                                             | 0,1397                                                                                           |
| <sup>33</sup> As | 76  | Стабилен           | 7,8 (2)                                                                 | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 77  | 11,30 (1) ч        | β <sup>-</sup>                                                          | 2,2                                           | 0,21* (61); 0,263 (45); 0,368 (15); 0,417 (25); 0,563 (18); 0,73** (14)                          |
|                  | 77m | 52,9 (6) с         | β <sup>-</sup> (76)<br>и. п. (24)                                       | 2,9<br>—                                      | 0,159 (12); 0,215 (21)                                                                           |
|                  | 78  | 88 (1) мин         | β <sup>-</sup>                                                          | 0,71                                          | 0,277 (94); 0,294                                                                                |
|                  | 79  | 19,1 (3) с         | β <sup>-</sup>                                                          | 4,1                                           | 0,109                                                                                            |
|                  | 79m | 39,0 (10) с        | и. п.                                                                   | —                                             | 0,186                                                                                            |
|                  | 80  | 29,5 (4) с         | β <sup>-</sup>                                                          | 2,4                                           | 0,266; 0,937; 1,564                                                                              |
|                  | 81  | 10,1 с             | β <sup>-</sup>                                                          | ~5,6; ~5,3                                    | 0,336; 0,737; 0,793                                                                              |
|                  | 82  | 4,6 (4) с          | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | 1,093                                                                                            |
|                  | 83  | 1,9 (4) с          | —                                                                       | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 84  | 1,2 (3) с          | —                                                                       | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 66  | 0,0958 (4) с       | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 67  | 42,5 (12) с        | β <sup>+</sup>                                                          | 5,0; 4,7                                      | 0,121; 0,123; 0,244                                                                              |
|                  | 68  | 2,527 (13) мин     | э. з.                                                                   | —                                             | 0,651; 0,762; 1,016; 1,778                                                                       |
|                  | 69  | 15,2 (2) мин       | β <sup>+</sup>                                                          | 2,9                                           | 0,23; 0,511 (ан.)                                                                                |
|                  | 70  | 52,6 (3) мин       | β <sup>+</sup>                                                          | 2,89 (6); 2,14                                | 0,511 (183, ан.); 0,60 (23); 0,67 (25); 0,75 (23); 1,04 (78); 1,12 (23); 1,71 (22)               |
|                  | 71  | 64,8 (7) ч         | э. з. (70)<br>β <sup>+</sup> (30)                                       | —<br>0,81                                     | 0,175 (90); 0,511 (60, ан.)                                                                      |
|                  | 72  | 26,0 (1) ч         | β <sup>+</sup> , э. з.                                                  | 3,34 (17); 2,50                               | 0,511 (150, ан.); 0,630 (8); 0,835 (78)                                                          |
|                  | 73  | 80,30 (6) сут      | э. з.                                                                   | —                                             | 0,054 (9)                                                                                        |
|                  | 74  | 17,78 (3) сут      | β <sup>-</sup> (32)<br>β <sup>+</sup> (29)                              | 1,36<br>1,54 (3); 0,95 (26)                   | 0,511 (59, ан.) 0,596 (61); 0,635 (14)                                                           |
| <sup>34</sup> Se | 74m | 8,0 с              | э. з. (39)<br>и. п.                                                     | —<br>—                                        | 0,283                                                                                            |
|                  | 75  | Стабилен           | 100                                                                     | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 76  | 26,32 (7) ч        | β <sup>-</sup>                                                          | 2,97                                          | 0,559 (43); 0,657 (6); 1,22* (5)                                                                 |
|                  | 77  | 38,83 (5) ч        | β <sup>-</sup>                                                          | 0,68                                          | 0,239 (2,5); 0,522 (0,8)                                                                         |
|                  | 78  | 90,7 (2) мин       | β <sup>-</sup>                                                          | 4,1                                           | 0,614/42/; 0,70/15/; 0,83/8/; 1,31/11/                                                           |
|                  | 79  | 9,01 (15) мин      | β <sup>-</sup>                                                          | 2,15                                          | 0,36 (2); 0,43 (2); 0,89 (1)                                                                     |



| Эле-<br>мент     | A   | Период полураспада        | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                  |
|------------------|-----|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                  |     |                           |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                      |
| <sup>84</sup> Se | 80  | 15,2 (2) с                | β <sup>-</sup>                                                                       | 6,0                                           | 0,66 (42); 1,22 (4); 1,64 (4);<br>1,77 (1,7)                     |
|                  | 81  | 33 (2) с                  | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,8                                           | 0,468; 0,491                                                     |
|                  | 82  | 21 с                      | β <sup>-</sup>                                                                       | 7,1                                           | 0,655; 1,080; 1,731                                              |
|                  | 83  | 14,1 (11) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,4                                           | 0,735; 1,113                                                     |
|                  | 84  | 5,5 (3) с                 | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (0,1)                                               | —                                             | 0,667; 1,455                                                     |
|                  | 85  | 2,028 (12) с              | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (23)                                                | —                                             | —                                                                |
|                  | 86  | 0,9 (2) с                 | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (~ 4)                                               | —                                             | 0,704                                                            |
|                  | 87  | 0,75 (6) с                | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                                |
|                  | 69  | 27,4 (2) с                | э. з.; э. з. p (0,07)                                                                | —                                             | 0,098; 0,691                                                     |
|                  | 70  | 41,0 (6) мин              | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                |
|                  | 71  | 4,74 (5) мин              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,16; 0,511 (ан.)                                                |
|                  | 72  | 8,40 (8) сут              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,046 (59)                                                       |
|                  | 73  | 7,15 (8) ч                | β <sup>+</sup> (65)                                                                  | 1,30                                          | 0,066 (65); 0,359 (99);<br>0,511 (130, ан.)                      |
|                  | 73m | 39,8 (13) мин             | э. з. (35)                                                                           | —                                             | 0,0257                                                           |
|                  |     |                           | э. з. (27)                                                                           | —                                             | —                                                                |
|                  |     |                           | и. п. (73)                                                                           | —                                             | —                                                                |
|                  | 74  | Стабилен                  | 0,9 (1)                                                                              | —                                             | —                                                                |
|                  | 75  | 119,77 (1) сут            | э. з.                                                                                | —                                             | 0,121 (17); 0,136 (57);<br>0,265 (60); 0,280 (25); 0,401(12)     |
|                  | 76  | } Стабилен                | 9,0 (2)                                                                              | —                                             | —                                                                |
|                  | 77  |                           | 7,6 (2)                                                                              | —                                             | —                                                                |
|                  | 77m | 17,45 (10) с              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,162 (50)                                                       |
|                  | 78  | Стабилен                  | 23,6 (6)                                                                             | —                                             | —                                                                |
|                  | 79  | ~ 6,5·10 <sup>4</sup> лет | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,16                                          | —                                                                |
|                  | 79m | 3,91 (5) мин              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,096 (9)                                                        |
|                  | 80  | Стабилен                  | 49,7 (7)                                                                             | —                                             | —                                                                |
|                  | 81  | 18,5 мин                  | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,58                                          | 0,28** (0,9); 0,56** (0,3);<br>0,83 (0,2)                        |
|                  | 81m | 57,25 мин                 | и. п. (>99)                                                                          | —                                             | 0,103 (8)                                                        |
|                  |     |                           | β <sup>-</sup> (0,058)                                                               | —                                             | —                                                                |
|                  | 82  | 1,4·10 <sup>20</sup> лет  | 9,2(5)                                                                               | —                                             | —                                                                |
|                  | 83  | 22,5 (2) мин              | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,8                                           | 0,22 (44); 0,36 (69); 1,88 (16);<br>2,29 (9)                     |
|                  | 83m | 70,4 (3) с                | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,8                                           | 0,35/16/; 0,65/20/;<br>1,01**/100/; 2,02/40/                     |
|                  | 84  | 3,2 (2) мин               | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,4                                           | 0,407                                                            |
|                  | 85  | 31,7 (9) с                | β <sup>-</sup>                                                                       | 6,2                                           | 0,345; 1,427; 3,396                                              |
|                  | 86  | 15,3 (9) с                | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,6                                           | 2,441; 2,660                                                     |
|                  | 87  | 5,55 (20) с               | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (0,16)                                              | —                                             | 0,243; 0,334; 0,468; 0,573                                       |
|                  | 88  | 1,53 (6) с                | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (0,8)                                               | —                                             | 0,159; 0,259; 1,904                                              |
|                  | 89  | 0,41 (4) с                | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (5)                                                 | —                                             | —                                                                |
|                  | 91  | 0,27 (5) с                | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (~ 21)                                              | —                                             | —                                                                |
| <sup>85</sup> Br | 72  | 78,6 (24) с               | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                |
|                  | 73  | 3,4 (3) мин               | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                |
|                  | 74  | 25,3 (3) мин              | β <sup>+</sup>                                                                       | 4,7                                           | 0,511 (ан.); 0,64                                                |
|                  | 74m | 41,5 (15) мин             | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | 0,195                                                            |
|                  | 75  | 97 (2) мин                | β <sup>+</sup> (90)                                                                  | 1,70                                          | 0,285; 0,511 (ан.); 0,62                                         |
|                  |     |                           | э. з. (~ 10)                                                                         | —                                             | —                                                                |
|                  | 76  | 16,2 (2) ч                | β <sup>+</sup> (~ 62)                                                                | 3,6                                           | 0,511 (133, ан.); 0,559 (63);<br>0,65 (19); 1,21 (13); 1,86 (11) |
|                  |     |                           | э. з. (~ 38)                                                                         | —                                             | —                                                                |
|                  | 77  | 57,036 (6) ч              | э. з. (99)                                                                           | —                                             | 0,24** (30); 0,52 (24); 0,58 (7)                                 |
|                  |     |                           | β <sup>+</sup> (1)                                                                   | 0,34                                          | —                                                                |
|                  | 77m | 4,28 (10) мин             | и. п.                                                                                | —                                             | 0,106                                                            |
|                  | 78  | 6,46 (4) мин              | β <sup>-</sup> (< 0,01)                                                              | 2,55                                          | 0,511 (184, ан.); 0,614 (14)                                     |
|                  |     |                           | э. з. (> 99)                                                                         | —                                             | —                                                                |
|                  | 79  | Стабилен                  | 50,69 (5)                                                                            | —                                             | —                                                                |
|                  | 79m | 4,864 (30) с              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,207                                                            |
|                  | 80  | 17,68 (2) мин             | β <sup>-</sup> (92)                                                                  | 2,00                                          | 0,511 (5, ан.); 0,618 (7);<br>0,666 (1)                          |
|                  |     |                           | β <sup>+</sup> (2,6)                                                                 | 0,87                                          | —                                                                |
|                  |     |                           | э. з. (5,7)                                                                          | —                                             | —                                                                |

| Элемент          | A   | Период полураспада            | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                             |
|------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                  |     |                               |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                         |
| $^{36}\text{Kг}$ | 80m | 4,42 (1) ч                    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,086                                                       |
|                  | 81  | Стабилен                      | 49,31 (5)                                                               | —                                             | —                                                           |
|                  | 82  | 35,30 (2) ч                   | $\beta^-$                                                               | 0,444                                         | 0,554 (66); 0,619 (41); 0,777 (83); 1,044 (29)              |
|                  | 82m | 6,13 (8) мин                  | и. п. (97,6)                                                            | —                                             | } 0,046 (0,3); 0,777 (0,15)                                 |
|                  |     |                               | $\beta^-$ (2,4)                                                         | 3,1                                           |                                                             |
|                  | 83  | 2,39 (2) ч                    | $\beta^-$                                                               | 0,93                                          | 0,530 (1,4)                                                 |
|                  | 84  | 31,80 (8) мин                 | $\beta^-$                                                               | 4,68                                          | 0,88 (51); 1,90 (18); 3,93 (13)                             |
|                  | 84m | 6,0 (2) мин                   | $\beta^-$                                                               | 2,2                                           | 0,424; 0,882; 1,463                                         |
|                  | 85  | 172 (2) с                     | $\beta^-$                                                               | 2,5                                           | 0,802; 0,925                                                |
|                  | 86  | 55,0 (8) с                    | $\beta^-$                                                               | 7,1                                           | 1,36/39/; 1,56/100/; 2,75/36/                               |
|                  | 87  | 55,69 (13) с                  | $\beta^-$                                                               | 2,6                                           | 1,44/100/; 1,85/18/; 2,48/18/; 2,98/25/; 4,19/21/           |
|                  | 88  | 16,3 (3) с                    | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (6)                                              | —                                             | 0,76                                                        |
|                  | 89  | 4,53 (10) с                   | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (13)                                             | —                                             | 0,775; 1,098                                                |
|                  | 90  | 1,71 (14) с                   | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (23)                                             | —                                             | 0,707; 1,362                                                |
|                  | 91  | 0,541 (5) с                   | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (9)                                              | —                                             | 0,263; 0,803                                                |
|                  | 92  | 0,365 (7) с                   | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (16)                                             | —                                             | 0,740                                                       |
|                  | 72  | 17,2 (3) с                    | $\beta^+$                                                               | 3,8                                           | 0,163; 0,310; 0,415; 0,577                                  |
|                  | 73  | 27,0 (12) с                   | $\beta^+$ , $\beta^+p$ (0,7)                                            | —                                             | 0,178; 0,241; 0,455                                         |
|                  | 74  | 11,50 (11) мин                | $\beta^+$                                                               | 2,2; 2,0                                      | 0,511 (ан.)                                                 |
|                  | 75  | 4,3 (1) мин                   | $\beta^+$                                                               | 3,2                                           | 0,133; 0,155                                                |
|                  | 76  | 14,8 (1) ч                    | э. з.                                                                   | —                                             | 0,045; 0,270; 0,316; 0,407                                  |
|                  | 77  | 74,4 (6) мин                  | $\beta^+$ ( $\sim 80$ )                                                 | 1,86                                          | } 0,130; 0,147                                              |
|                  |     |                               | э. з. ( $\sim 20$ )                                                     | —                                             |                                                             |
|                  | 78  | Стабилен                      | 0,35 (2)                                                                | —                                             | —                                                           |
|                  | 79  | 35,04 (10) ч                  | э. з. (92)                                                              | —                                             | } 0,398 (10); 0,511 (15, ан); 0,606 (10)                    |
|                  |     |                               | $\beta^+$ (8)                                                           | 0,60                                          |                                                             |
|                  | 79m | 50 (3) с                      | и. п.                                                                   | —                                             | 0,130                                                       |
|                  | 80  | Стабилен                      | 2,25 (2)                                                                | —                                             | —                                                           |
|                  | 81  | 2,1 (2) · 10 <sup>5</sup> лет | э. з.                                                                   | —                                             | 0,276                                                       |
|                  | 81m | 13 с                          | и. п.                                                                   | —                                             | 0,190 (65)                                                  |
|                  | 82  | } Стабилен                    | 11,6 (1)                                                                | —                                             | —                                                           |
|                  | 83  |                               | 11,5 (1)                                                                | —                                             | —                                                           |
|                  | 83m | 1,83 (2) ч                    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,009; 0,042                                                |
|                  | 84  | Стабилен                      | 57,0 (3)                                                                | —                                             | —                                                           |
|                  | 85  | 10,72 (2) года                | $\beta^-$                                                               | 0,67                                          | 0,514 (0,4)                                                 |
|                  | 85m | 4,480 (8) ч                   | $\beta^-$ (79)                                                          | 0,82                                          | } 0,150 (74); 0,305 (13)                                    |
|                  |     |                               | и. п. (21)                                                              | —                                             |                                                             |
|                  | 86  | Стабилен                      | 17,3 (2)                                                                | —                                             | —                                                           |
|                  | 87  | 76,31 (62) мин                | $\beta^-$                                                               | 3,8                                           | 0,403 (84); 0,85 (16); 2,57 (35)                            |
|                  | 88  | 2,84 (3) ч                    | $\beta^-$                                                               | 2,8                                           | 0,191 (35); 0,85 (23); 1,55 (14); 2,40 (35)                 |
|                  | 89  | 3,07 (9) мин                  | $\beta^-$                                                               | 4,0                                           | 0,23/85/; 0,51/42/; 0,60/100/; 0,88/65/; 1,12/45/; 1,51/88/ |
|                  | 90  | 32,32 (9) с                   | $\beta^-$                                                               | 4,4; 2,6                                      | 0,120 (65); 0,536 (48); 1,11 (48)                           |
|                  | 91  | 8,57 (4) с                    | $\beta^-$                                                               | 6,4; 3,6                                      | 0,109; 0,507; 0,613; 1,109                                  |
|                  | 92  | 1,85 (1) с                    | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (0,032)                                          | —                                             | 0,142; 0,548; 0,813; 1,219                                  |
|                  | 93  | 1,289 (12) с                  | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (1,9)                                            | —                                             | 0,253; 0,267; 0,324; 2,350                                  |
|                  | 94  | 0,20 (1) с                    | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (6)                                              | —                                             | 0,220; 0,359; 0,629                                         |
|                  | 95  | 0,78 (3) с                    | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                                           |
|                  | 97  | < 0,1 с                       | —                                                                       | —                                             | —                                                           |
| $^{37}\text{Rb}$ | 75  | 17,2 (8) с                    | э. з.                                                                   | —                                             | 0,179                                                       |
|                  | 76  | 36,8 (15) с                   | $\beta^+$                                                               | 5,2                                           | 0,354; 0,423; 2,573                                         |
|                  | 77  | 3,70 (15) мин                 | э. з.                                                                   | —                                             | 0,067; 0,179; 0,394                                         |
|                  | 78  | 17,66 (8) мин                 | э. з.                                                                   | —                                             | 0,455; 0,693; 3,438                                         |
|                  | 79  | 22,9 (5) мин                  | э. з.                                                                   | —                                             | 0,15 (73); 0,19 (29); 0,511 (180, ан.)                      |
|                  | 80  | 34 (4) с                      | $\beta^+$                                                               | 4,7                                           | 0,511 (195, ан.); 0,618 (39)                                |
|                  | 81  | 4,58 (1) ч                    | э. з. (87)                                                              | —                                             | } 0,446                                                     |
|                  |     |                               | $\beta^+$ (13)                                                          | 1,03                                          |                                                             |

| Эле-<br>мент     | A   | Период полураспада                    | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                        |
|------------------|-----|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|                  |     |                                       |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                            |
| <sup>88</sup> Sr | 81m | 32 мин                                | β <sup>+</sup> , и. п.                                                               | 1,4                                           | 0,085                                                  |
|                  | 82  | 1,25 (3) мин                          | β <sup>+</sup> (96)                                                                  | 3,15                                          | } 0,511 (192, ан.); 0,777 (9)                          |
|                  | 82m | 6,2 (5) ч                             | э. з. (4)                                                                            | —                                             |                                                        |
|                  |     |                                       | э. з. (94)                                                                           | —                                             | 0,554 (66); 0,619 (41); 0,777 (83)                     |
|                  | 83  | 86,2 (1) сут                          | β <sup>+</sup> (6)                                                                   | 0,78                                          | } 0,53** (93); 0,79 (0,9)                              |
|                  | 84  | 32,87 (11) сут                        | э. з.                                                                                | —                                             |                                                        |
|                  |     |                                       | э. з. (76)                                                                           | —                                             | } 0,511 (42, ан.); 0,88 (74)                           |
|                  | 84m | 20,49 (17) мин                        | β <sup>+</sup> (21)                                                                  | 1,66                                          |                                                        |
|                  | 85  | Стабилен                              | β <sup>-</sup> (3)                                                                   | 0,91                                          | } 0,216 (37); 0,250 (65); 0,464 (32)                   |
|                  | 86  | 18,66 (2) сут                         | и. п.                                                                                | —                                             |                                                        |
|                  |     |                                       | 72,165 (13)                                                                          | —                                             | —                                                      |
|                  | 86m | 1,017 (3) мин                         | β <sup>-</sup> (> 99),                                                               | 1,78                                          | 1,078 (8,8)                                            |
|                  | 87  | 4,80 (13) ×<br>× 10 <sup>10</sup> лет | э. з. (0,005)                                                                        | —                                             | 0,556                                                  |
|                  |     |                                       | и. п.                                                                                | —                                             | —                                                      |
|                  | 87m | 4,80 (13) ×<br>× 10 <sup>10</sup> лет | 27,835 (13)                                                                          | —                                             | —                                                      |
|                  | 88  | 17,8 (1) мин                          | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,274                                         | —                                                      |
|                  | 89  | 15,2 (1) мин                          | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,3                                           | 0,898 (13); 1,863 (21)                                 |
|                  | 90  | 153 (3) с                             | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,92 (7); 2,9 (5); 1,6                        | 0,66 (17); 1,05 (75); 1,26 (54)                        |
|                  |     |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | 6,6                                           | 0,83* (61); 3,34** (15);<br>4,13 (11); 4,34* (18)      |
|                  | 90m | 258 (5) с                             | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,107                                                |
|                  |     |                                       | и. п.                                                                                | —                                             |                                                        |
|                  | 91  | 58,4 (4) с                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,8                                           | 0,094; 0,346; 2,564; 3,6                               |
|                  | 92  | 4,50 (2) с                            | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (0,012)                                             | —                                             | 0,570; 0,815; 2,821                                    |
|                  | 93  | 5,8 (1) с                             | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (1,3)                                               | —                                             | 0,213; 0,433 0,986; 1,385                              |
|                  | 94  | 2,69 (4) с                            | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (10)                                                | —                                             | 0,837; 1,09; 1,309; 1,578                              |
|                  | 95  | 0,384 (6) с                           | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (8,4)                                               | —                                             | 0,204; 0,329; 0,352; 0,681                             |
|                  | 96  | 0,199 (3) с                           | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (13)                                                | —                                             | 0,815; 1,037                                           |
|                  | 97  | 0,176 (6) с                           | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (27)                                                | —                                             | 0,167; 0,585; 0,599                                    |
|                  | 98  | 0,114 (5) с                           | β <sup>-</sup> , β <sup>-n</sup> (13)                                                | —                                             | 0,144; 2,172                                           |
|                  | 99  | 0,076 (5) с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,091; 0,145                                           |
|                  | 78  | ~ 30,6 мин                            | —                                                                                    | —                                             | —                                                      |
|                  | 79  | 2,25 (10) мин                         | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                      |
|                  | 80  | 106,3 (15) мин                        | э. з.                                                                                | —                                             | 0,58                                                   |
|                  | 81  | 25,5 мин                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,15; 0,19; 0,44                                       |
|                  | 82  | 25,0 (4) сут                          | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                      |
|                  | 83  | 32,4 (2) ч                            | э. з. (84)                                                                           | —                                             | } 0,040 (24); 0,38 (35);<br>0,511 (32, ан.); 0,76 (40) |
|                  |     |                                       | β <sup>+</sup> (16)                                                                  | 1,15                                          |                                                        |
|                  | 84  | Стабилен                              | 0,56 (1)                                                                             | —                                             | —                                                      |
|                  | 85  | 64,84 (2) сут                         | э. з.                                                                                | —                                             | 0,514 (100)                                            |
|                  | 85m | 67,66 (7) мин                         | и. п. (86)                                                                           | —                                             | } 0,150 (14); 0,239 (85)                               |
|                  |     |                                       | э. з. (14)                                                                           | —                                             |                                                        |
|                  | 86  | } Стабилен                            | 9,86 (1)                                                                             | —                                             | —                                                      |
|                  | 87  |                                       | 7,00 (1)                                                                             | —                                             | —                                                      |
|                  | 87m |                                       | и. п. (> 99)                                                                         | —                                             | } 0,388 (80)                                           |
|                  |     |                                       | э. з. (0,3)                                                                          | —                                             |                                                        |
|                  | 88  | Стабилен                              | 82,58 (1)                                                                            | —                                             | —                                                      |
|                  | 89  | 50,55 (9) сут                         | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,463                                         | 0,91 (0,01)                                            |
|                  | 90  | 28,6 (3) лет                          | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,546                                         | —                                                      |
|                  | 91  | 9,52 (6) ч                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,67                                          | 0,645 (15); 0,748 (27); 1,025 (30)                     |
|                  | 92  | 2,71 (1) ч                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,5 (10); 0,55                                | 0,44 (3); 1,37 (90)                                    |
|                  | 93  | 7,6 (2) мин                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,9                                           | 0,60; 0,8; 1,2                                         |
|                  | 94  | 78 (2) с                              | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,5; 2,1                                      | 1,42 (100)                                             |
|                  | 95  | 25,1 (2) с                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 6,1                                           | 0,686; 2,247; 2,717; 2,933                             |
|                  | 96  | 1,06 (4) с                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,4                                           | 0,122; 0,809; 0,932                                    |
|                  | 97  | 0,40 с                                | β <sup>-</sup>                                                                       | 7,4; 5,2                                      | 0,307; 0,652; 0,954; 1,905                             |
|                  | 98  | 0,65 (3) с                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,7                                           | 0,037; 0,119; 0,429; 0,445                             |
| <sup>89</sup> Y  | 81  | 5 мин                                 | —                                                                                    | —                                             | —                                                      |
|                  | 82  | ~ 10 мин                              | —                                                                                    | —                                             | —                                                      |
|                  | 83  | 7,06 (8) мин                          | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                      |

| Эле-<br>мент     | A   | Период полураспада         | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                  |
|------------------|-----|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                  |     |                            |                                                                                      | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                              |
| $^{90}\text{Zr}$ | 84  | 40 (1) мин                 | $\beta^+$                                                                            | 3,5                                           | 0,795 (100); 0,982 (100);                                        |
|                  | 85  | 2,68 (5) ч                 | $\beta^+$ (70)<br>э. з. (30)                                                         | 2,24<br>1,54                                  | 1,041 (50)<br>} 0,231 (13); 0,511 (140, ан.)                     |
|                  | 85m | 4,86 (13) ч                | $\beta^+$ (55)<br>э. з. (45)                                                         | —<br>—                                        | } 0,51** (200); 0,92 (9)                                         |
|                  | 86  | 14,74 (2) ч                | э. з. (74)<br>$\beta^+$ (26)                                                         | —<br>3,15; 2,34                               | } 0,51* (35); 0,63* (37);<br>} 1,077 (82); 1,16*(35); 1,925 (24) |
|                  | 86m | 48 (1) мин                 | и. п. (99,31)<br>$\beta^+$ (0,69)                                                    | —<br>—                                        | } 0,218 (94)                                                     |
|                  | 87  | 80,3 (3) ч                 | э. з. ( $> 99$ )<br>$\beta^+$ (0,3)                                                  | —<br>—                                        | } 0,483                                                          |
|                  | 87m | 12,9 (4) ч                 | и. п. ( $\sim 98$ )<br>э. з. ( $\sim 2$ )                                            | —<br>—                                        | } 0,381 (74)                                                     |
|                  | 88  | 106,60 (4) сут             | э. з. ( $> 99$ )<br>$\beta^+$ (0,2)                                                  | —<br>0,76                                     | } 0,898 (93); 1,836 (100);<br>} 2,734 (1)                        |
|                  | 89  | Стабилен                   | 100                                                                                  | —                                             | —                                                                |
|                  | 89m | 16,06 (4) с                | и. п.                                                                                | —                                             | 0,909 (99)                                                       |
|                  | 90  | 64,1 (1) ч                 | $\beta^-$                                                                            | 2,27                                          | —                                                                |
|                  | 90m | 3,19 (1) ч                 | и. п. ( $> 99$ )<br>$\beta^-$ (0,0021)                                               | —<br>—                                        | } 0,202 (97); 0,482 (91)                                         |
|                  | 91  | 58,51 (6) сут              | $\beta^-$                                                                            | 1,545                                         | 1,21 (0,3)                                                       |
|                  | 91m | 49,71 (4) мин              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,555                                                            |
|                  | 92  | 3,54 (1) ч                 | $\beta^-$                                                                            | 3,63                                          | 0,934 (14); 1,40 (4,7)                                           |
|                  | 93  | 10,1 (2) ч                 | $\beta^-$                                                                            | 2,89                                          | 2,267 (6); 0,94 (2,3); 1,90 (1,8)                                |
|                  | 94  | 19,1 (4) мин               | $\beta^-$                                                                            | 5,0                                           | 0,56 (6); 0,92 (43); 1,13 (5)                                    |
|                  | 95  | 10,3 (2) мин               | $\beta^-$                                                                            | 4,4                                           | 0,954; 1,324; 2,176; 2,633;<br>3,577                             |
|                  | 96  | 2,3 (1) мин                | $\beta^-$                                                                            | —                                             | —                                                                |
|                  | 97  | 1,11 (14) с                | $\beta^-$                                                                            | 6,0; 5,1                                      | —                                                                |
|                  | 98  | 0,64 (3) с                 | $\beta^-$                                                                            | 8,8                                           | 1,22; 1,59; 2,94; 4,45                                           |
|                  | 99  | 1,5 (1) с                  | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (1)                                                           | —                                             | 0,122; 0,724                                                     |
|                  | 102 | 0,27 (7) с                 | $\beta^-$                                                                            | —                                             | —                                                                |
|                  | 81  | 10 мин                     | —                                                                                    | —                                             | —                                                                |
|                  | 84  | 5,05 (5) мин               | —                                                                                    | —                                             | —                                                                |
|                  | 85  | 7,86 (4) мин               | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                |
|                  | 85m | 10,9 (3) с                 | и. п.                                                                                | —                                             | 0,292                                                            |
|                  | 86  | 16,5 (1) ч                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,028 (20); 0,243 (96); 0,612 (5)                                |
|                  | 87  | 104,0 (5) мин              | $\beta^+$                                                                            | 2,10                                          | 0,511 (ан.); 1,2; 2,2                                            |
|                  | 87m | 14,0 (2) с                 | и. п.                                                                                | —                                             | 0,336; 0,201; 0,135                                              |
|                  | 88  | 83,4 (3) сут               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,394 (97)                                                       |
|                  | 89  | 78,43 (8) ч                | э. з. (78)<br>$\beta^+$ (22)                                                         | —<br>0,90                                     | } 0,511 (44, ан.); 0,91 (99)                                     |
|                  | 89m | 4,18 (1) мин               | и. п. (94)<br>э. з. (4,7)<br>$\beta^+$ (1,3)                                         | —<br>—<br>2,40 (0,2); 0,89 (1,2)              | } 0,588 (87); 1,51 (6)                                           |
|                  | 90  | } Стабилен                 | 51,45 (2)                                                                            | —                                             | —                                                                |
|                  | 91  |                            | 11,22 (2)                                                                            | —                                             | —                                                                |
|                  | 92  |                            | 17,15 (1)                                                                            | —                                             | —                                                                |
|                  | 93  |                            | $\beta^-$                                                                            | 0,060                                         | —                                                                |
|                  | 94  |                            | 17,38 (2)                                                                            | —                                             | —                                                                |
|                  | 95  | 64,02 (4) сут              | $\beta^-$                                                                            | 0,89 (2); 0,396                               | 0,724 (49); 0,756 (49)                                           |
|                  | 96  | $> 3,56 \cdot 10^{17}$ лет | 2,80 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                |
|                  | 97  | 17,0 (2) ч                 | $\beta^-$                                                                            | 1,91                                          | 0,747 (92); 1,148                                                |
|                  | 98  | 30,7 (4) с                 | $\beta^-$                                                                            | 2,3                                           | —                                                                |
|                  | 99  | 2,1 (1) с                  | $\beta^-$                                                                            | 3,5                                           | 0,47; 0,55; 0,59                                                 |
|                  | 102 | 2,9 (2) с                  | $\beta^-$                                                                            | —                                             | 0,535; 0,600                                                     |

| Элемент          | A   | Период полураспада          | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                |
|------------------|-----|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                  |     |                             |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                    |
| $^{41}\text{Nb}$ | 84  | 12 (3) с                    | э. з.                                                                   | —                                             | —                                              |
|                  | 86  | 80 (12) с                   | э. з.                                                                   | —                                             | —                                              |
|                  | 87  | 2,60 (7) мин                | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,201; 0,471                                   |
|                  | 88  | 14,3 (3) мин                | э. з.                                                                   | —                                             | 0,503; 0,671; 1,06; 1,08                       |
|                  | 89  | 122 (4) мин                 | $\beta^+$                                                               | 2,9                                           | 0,511 (ан.); 1,626; 3,577; 3,838               |
|                  | 90  | 14,60 (5) ч                 | $\beta^+$ , э. з.                                                       | 1,50                                          | 0,142 (75); 1,14 (97); 2,32 (82)               |
|                  | 91  | $\sim 1 \cdot 10^4$ лет     | э. з.                                                                   | —                                             | —                                              |
|                  | 91m | 62 сут                      | и. п. (97)                                                              | —                                             | } 0,104 (0,5); 1,21 (3)                        |
|                  |     |                             | э. з. (3)                                                               | —                                             |                                                |
|                  | 92  | 3,5 (3) $\cdot 10^7$ лет    | э. з.                                                                   | —                                             | 0,561; 0,934                                   |
|                  | 92m | 10,15 (2) сут               | э. з. ( $> 99$ )                                                        | —                                             | } 0,934 (99)                                   |
|                  |     |                             | $\beta^+$ (0,06)                                                        | —                                             |                                                |
|                  | 93  | Стабилен                    | 100                                                                     | —                                             | —                                              |
|                  | 93m | 13,6 (3) года               | и. п.                                                                   | —                                             | 0,030                                          |
|                  | 94  | 2,03 (16) $\times 10^4$ лет | $\beta^-$                                                               | 0,49                                          | 0,702 (100); 0,871 (100)                       |
|                  | 94m | 6,26 (1) мин                | и. п. ( $> 99$ )                                                        | —                                             | } 0,041; 0,871                                 |
|                  |     |                             | $\beta^-$ (0,5)                                                         | —                                             |                                                |
|                  | 95  | 34,97 (3) сут               | $\beta^-$                                                               | 0,160                                         | 0,765 (105)                                    |
|                  | 95m | 86,6 (8) ч                  | и. п. (97,5)                                                            | —                                             | } 0,235                                        |
|                  |     |                             | $\beta^-$ (2,5)                                                         | 1,0                                           |                                                |
|                  | 96  | 23,35 (5) ч                 | $\beta^-$                                                               | 0,7                                           | 0,459 (28); 0,569 (59); 0,778 (97); 1,092 (49) |
|                  | 97  | 72,1 (7) мин                | $\beta^-$                                                               | 1,27                                          | 0,665 (98)                                     |
|                  | 97m | 60 (1) с                    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,743 (98)                                     |
|                  | 98  | 2,86 (6) с                  | $\beta^-$                                                               | 4,6                                           | 0,787; 1,024                                   |
|                  | 98m | 51,3 (4) мин                | $\beta^-$                                                               | 3,1                                           | 0,720 (75); 0,787 (100) 1,16 (30)              |
|                  | 99  | 14,3 с                      | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,098; 0,138                                   |
|                  | 99m | 2,6 (2) мин                 | $\beta^-$                                                               | 3,2                                           | 0,100 /1/; 0,260 /1/                           |
|                  | 101 | 7,1 (3) с                   | $\beta^-$                                                               | 4,3                                           | 0,158; 0,276; 0,441; 0,480                     |
|                  | 103 | 1,5 (2) с                   | $\beta^-$                                                               | 5,4                                           | 0,103; 0,641                                   |
|                  | 105 | 1,8 (8) с                   | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                              |
| $^{42}\text{Mo}$ | 88  | 8,2 (5) мин                 | $\beta^+$                                                               | 2,5                                           | 0,511 (ан.); 2,69                              |
|                  | 90  | 5,67 (5) ч                  | $\beta^+$ (25)                                                          | 1,2                                           | } 0,122 (71); 0,257 (85);                      |
|                  |     |                             | э. з. (75)                                                              | —                                             |                                                |
|                  | 91  | 15,49 (1) мин               | $\beta^+$                                                               | 3,44                                          | 0,511 (50, ан.)                                |
|                  | 91m | 65,2 (8) с                  | и. п. ( $\sim 57$ )                                                     | —                                             | 0,511 (ан.)                                    |
|                  |     |                             | $\beta^+$ ( $\sim 43$ )                                                 | 3,99/15/; 2,78 /100/                          | } 0,658 (54); 1,21 (22); 1,53 (15)             |
|                  |     |                             | 14,84 (4)                                                               | —                                             |                                                |
|                  | 92  | Стабилен                    | э. з.                                                                   | —                                             | —                                              |
|                  | 93  | 3,5 (7) $\cdot 10^3$ лет    | и. п. (99,88);                                                          | —                                             | } 0,264 (58); 0,685 (100);                     |
|                  | 93m | 6,85 (7) ч                  | э. з. (0,12)                                                            | —                                             |                                                |
|                  |     |                             |                                                                         |                                               | 1,479 (100)                                    |
|                  | 94  | } Стабилен                  | 9,25 (2)                                                                | —                                             | —                                              |
|                  | 95  |                             | 15,92 (4)                                                               | —                                             | —                                              |
|                  | 96  |                             | 16,68 (4)                                                               | —                                             | —                                              |
|                  | 97  |                             | 9,55 (2)                                                                | —                                             | —                                              |
|                  | 98  |                             | 24,13 (6)                                                               | —                                             | —                                              |
|                  | 99  | 66,02 (1) ч                 | $\beta^-$                                                               | 1,23                                          | 0,181 (7); 0,740 (12); 0,780 (4)               |
|                  | 100 | Стабилен                    | 9,63 (2)                                                                | —                                             | —                                              |
|                  | 101 | 14,6 (1) мин                | $\beta^-$                                                               | 2,23                                          | 0,191 (25); 0,59 (21); 1,02 (25)               |
|                  | 102 | 11,3 (2) мин                | $\beta^-$                                                               | 1,2                                           | 0,148; 0,212; 0,224                            |
|                  | 103 | 67,5 (15) с                 | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,424                                          |
|                  | 104 | 1,3 (3) мин                 | $\beta^-$                                                               | 4,8                                           | 0,070                                          |
|                  | 105 | 36,7 (10) с                 | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,077; 0,085; 0,148                            |
|                  | 106 | 8,4 (5) с                   | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,054; 0,466; 0,619                            |
|                  | 108 | 1,5 (4) с                   | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,26                                           |
| $^{43}\text{Tc}$ | 91  | 3,14 (2) мин                | $\beta^+$                                                               | 5,2                                           | —                                              |
|                  | 92  | 4,4 (3) мин                 | $\beta^+$ ( $\sim 92$ )                                                 | 4,1                                           | } 0,14 (67); 0,33 (90);                        |
|                  |     |                             | э. з. ( $\sim 8$ )                                                      | —                                             |                                                |
|                  |     |                             |                                                                         |                                               | 0,511 (184, ан.);                              |
|                  |     |                             |                                                                         |                                               | 0,79 (95); 1,54 (100)                          |

| Эле-<br>мент     | A    | Период полураспада             | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                                                                                                     |
|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                                |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                                                                                                         |
| <sup>44</sup> Ru | 93   | 2,75 (5) ч                     | э. з. (87)                                                                           | —                                             | } 0,511 (26, ан.); 1,35 (65);<br>1,49 (33)<br>0,390 (63); 2,66 (18)                                                                                                 |
|                  | 93m  | 43,5 (10) мин                  | β <sup>+</sup> (13)                                                                  | 0,80                                          |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | и. п. (80)                                                                           | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 94   | 293 (1) мин                    | э. з. (20)                                                                           | —                                             | } 0,511 (22, ан.); 0,702 (100);<br>0,849 (100); 0,871 (100)<br>0,511 (132, ан.); 0,871 (91);<br>1,53 (10); 1,87 (9)                                                 |
|                  | 94m  | 52 (1) мин                     | β <sup>+</sup> (11)                                                                  | 0,816                                         |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | э. з. (89)                                                                           | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | β <sup>+</sup> (66)                                                                  | 2,47                                          | } 0,204 (70); 0,584 (36); 0,838 (27)<br>0,778 (100); 0,81 (84);<br>0,851 (100); 1,12 (16)                                                                           |
|                  | 95   | 20,0 (1) ч                     | э. з. (34)                                                                           | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 95m  | 61 (2) сут                     | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | э. з. (95)                                                                           | —                                             | } 0,034; 0,778; 1,200<br>—<br>—                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | β <sup>+</sup> (0,42)                                                                | 0,68                                          |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | и. п. (4)                                                                            | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 96   | 4,28 (7) сут                   | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,66 (100); 0,76 (100)<br>0,1426 (90)<br>0,540; 0,60                                                                                                              |
|                  | 96m  | 51,5 (10) мин                  | э. з. (2)                                                                            | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | и. п. (98)                                                                           | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 97   | 2,6 (4) · 10 <sup>6</sup> лет  | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,47; 0,63<br>0,135/17; 0,21/10/<br>0,36; 0,53; 0,88; 0,89<br>0,108; 0,143; 0,159; 0,321<br>0,270; 1,97; 2,24; 2,79<br>0,10; 0,18<br>0,24; 0,47; 0,71; 0,73; 1,58 |
|                  | 97m  | 91 сут                         | и. п.                                                                                | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 98   | 4,2 (3) · 10 <sup>6</sup> лет  | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,0                                           |                                                                                                                                                                     |
|                  | 99   | 2,13 (5) · 10 <sup>6</sup> лет | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,292                                         | } 0,241<br>0,135; 0,214; 0,259<br>0,367; 0,891<br>0,340 (70); 0,511 (30, ан.);<br>0,625 (13); 1,09 (21)                                                             |
|                  | 99m  | 6,02 (3) ч                     | и. п. (> 99),<br>(~ 1 · 10 <sup>-4</sup> )                                           | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 100  | 15,8 (1) с                     | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,38                                          | } 0,215 (91); 0,324 (8)<br>—<br>—                                                                                                                                   |
|                  | 101  | 14,2 (1) мин                   | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,32                                          |                                                                                                                                                                     |
|                  | 102  | 5,28 (15) с                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,2                                           |                                                                                                                                                                     |
|                  | 102m | 4,35 (7) мин                   | β <sup>-</sup> (~ 98)                                                                | 2,0                                           | } 0,497 (88); 0,610 (6)<br>0,317*(11); 0,475*(20);<br>0,67*(16); 0,726 (48)                                                                                         |
|                  |      |                                | и. п. (~ 2)                                                                          | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 103  | 54,2 (8) с                     | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,2                                           |                                                                                                                                                                     |
|                  | 104  | 18,2 (5) мин                   | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,6                                           | } 0,195 (14); 0,86 (7)<br>0,165 (28)<br>0,206; 0,226; 1,93<br>0,096; 0,112                                                                                          |
|                  | 105  | 7,7 (2) мин                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,4                                           |                                                                                                                                                                     |
|                  | 106  | 36 (1) с                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 107  | 21,2 (2) с                     | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 108  | 5,17 (7) с                     | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 109  | 1,4 (4) с                      | —                                                                                    | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 110  | 0,83 (4) с                     | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  |      |                                | —                                                                                    | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             |                                                                                                                                                                     |
| <sup>44</sup> Ru | 92   | 3,65 (5) мин                   | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 94   | 51,8 (6) мин                   | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 95   | 1,64 (1) ч                     | э. з. (85)                                                                           | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | β <sup>+</sup> (15)                                                                  | 1,33                                          | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 96   | Стабилен                       | 5,52 (5)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 97   | 2,9 (1) сут                    | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 98   | } Стабилен                     | 1,88 (5)                                                                             | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 99   |                                | 12,7 (1)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 100  |                                | 12,6 (1)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 101  |                                | 17,0 (1)                                                                             | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 102  |                                | 31,6 (2)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 103  | 39,35 (5) сут                  | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,70 (3); 0,21                                |                                                                                                                                                                     |
|                  | 104  | Стабилен                       | 18,7 (2)                                                                             | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 105  | 4,44 (2) ч                     | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,87 (11); 1,15                               |                                                                                                                                                                     |
|                  |      |                                | —                                                                                    | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 106  | 371,63 (17) сут                | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,039                                         | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 107  | 3,75 (5) мин                   | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,2                                           |                                                                                                                                                                     |
|                  | 108  | 4,55 (5) мин                   | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,3                                           |                                                                                                                                                                     |
|                  | 109  | 35 (3) с                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
|                  | 110  | 14,6 (10) с                    | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 111  | 2,2 (7) с                      | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 112  | 4,65 (14) с                    | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } —<br>—<br>—                                                                                                                                                       |
| <sup>45</sup> Rh | 95   | 5,02 (10) мин                  | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                                                                                                     |
|                  | 95m  | 1,96 (4) мин                   | э. з. (12), и. п. (88)                                                               | —                                             | } 0,543; 0,784<br>0,63; 0,68; 0,83<br>0,052; 1,10; 1,70                                                                                                             |
|                  | 96   | 9,90 (10) мин                  | β <sup>+</sup>                                                                       | 3,3                                           |                                                                                                                                                                     |
|                  | 96m  | 1,51 (2) мин                   | β <sup>+</sup> (40), и. п. (60)                                                      | —                                             |                                                                                                                                                                     |

| Эле-<br>мент     | A    | Период полураспада                 | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                      |
|------------------|------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
|                  |      |                                    |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                          |
| <sup>46</sup> Pd | 97   | 32 мин                             | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,1                                           | 0,422; 0,840; 0,879                  |
|                  | 98   | 8,7 (2) мин                        | β <sup>+</sup>                                                                       | 3,5; 2,8                                      | 0,65 (100)                           |
|                  | 98m  | 3,5 (3) мин                        | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | 0,050; 0,745                         |
|                  | 99   | 16 сут                             | э. з. (90)                                                                           | —                                             | } 0,511 (20, ан.); 0,62 (20)         |
|                  |      |                                    | β <sup>+</sup> (10)                                                                  | 0,74                                          |                                      |
|                  | 99m  | 4,7 ч                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,065; 0,341; 0,618; 1,261           |
|                  | 100  | 20,8 (1) ч                         | э. з. (93)                                                                           | —                                             | } 0,511 (13, ан.); 0,540 (88);       |
|                  |      |                                    | β <sup>+</sup> (7)                                                                   | 2,62                                          |                                      |
|                  | 101  | 3,3 (3) года                       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,820 (25); 2,37 (39)                |
|                  | 101m | 4,34 (1) сут                       | э. з. (92,8)                                                                         | —                                             | } 0,127 (88); 0,198 (75); 0,325 (11) |
|                  |      |                                    | и. п. (7,2)                                                                          | —                                             |                                      |
|                  | 102  | ~ 2,9 года                         | э. з.                                                                                | —                                             | 0,157; 0,307 (83); 0,545 (6)         |
|                  | 102m | 207 (3) сут                        | э. з., и. п. (5)                                                                     | —                                             | 0,475; 0,631; 0,697                  |
|                  |      |                                    | β <sup>+</sup>                                                                       | 1,29                                          | } 0,475 (57); 0,511 (25, ан.);       |
|                  |      |                                    | β <sup>-</sup> (19)                                                                  | 1,25                                          |                                      |
|                  | 103  | Стабилен                           | 100                                                                                  | —                                             | —                                    |
|                  | 103m | 56,12 (1) мин                      | и. п.                                                                                | —                                             | 0,040 (0,4)                          |
|                  | 104  | 42,3 (4) с                         | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,44                                          | 0,56 (2); 1,24 (0,13)                |
|                  | 104m | 4,34 (5) мин                       | и. п. (> 99)                                                                         | —                                             | } 0,051 (47); 0,078 (2,5);           |
|                  |      |                                    | β <sup>-</sup> (0,13)                                                                | —                                             |                                      |
|                  | 105  | 35,36 (6) ч                        | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,568                                         | 0,097 (2,6); 0,129                   |
|                  | 105m | 45 с                               | и. п.                                                                                | —                                             | 0,306 (5); 0,319 (19)                |
|                  | 106  | 29,80 (8) с                        | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,54                                          | 0,129                                |
|                  | 106m | 130 (2) мин                        | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,7; 0,9                                      | 0,512 (21); 0,622*(11)               |
|                  | 107  | 21,7 (4) мин                       | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,20                                          | 0,140; 0,512; 0,717; 1,046           |
|                  | 108  | 16,8 (5) с                         | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,5                                           | 0,305 (73); 0,390 (11)               |
|                  | 109  | 80 (2) с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,6; 2,3                                      | 0,434 (43); 0,51*(10); 0,62 (22)     |
|                  | 110  | 3,2 (2) с                          | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,5                                           | 0,11; 0,18; 0,29; 0,33; 0,43         |
|                  | 112  | 0,8 (1) с                          | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,374; 0,440; 0,797                  |
|                  | 113  | ~ 0,91 с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,349                                |
|                  | 114  | 1,68 (7) с                         | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,129                                |
|                  |      |                                    |                                                                                      |                                               | 0,333                                |
|                  | 98   | 17,7 (3) мин                       | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,3                                           | 0,112; 0,663; 0,838                  |
|                  | 99   | 21,4 (2) мин                       | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,2                                           | 0,136; 0,264; 0,673                  |
|                  | 100  | 3,63 (9) сут                       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,074 (34); 0,084 (49); 0,126 (16)   |
|                  | 101  | 8,47 (6) ч                         | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,296 (30); 0,590 (24)             |
|                  |      |                                    | β <sup>+</sup> (2,5)                                                                 | 0,78                                          |                                      |
|                  | 102  | Стабилен                           | 1,020 (12)                                                                           | —                                             | —                                    |
|                  | 103  | 16,96 (2) сут                      | э. з.                                                                                | —                                             | 0,297 (0,011); 0,362 (0,06);         |
|                  |      |                                    |                                                                                      |                                               | 0,498 (0,011)                        |
|                  | 104  | } Стабилен                         | 11,14 (8)                                                                            | —                                             | —                                    |
|                  | 105  |                                    | 22,33 (8)                                                                            | —                                             | —                                    |
|                  | 106  |                                    | 27,33 (5)                                                                            | —                                             | —                                    |
|                  | 107  |                                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,03                                          | —                                    |
|                  | 107m | 6,5 (3) ×<br>× 10 <sup>6</sup> лет | и. п.                                                                                | —                                             | 0,215                                |
|                  | 108  | 21,3 (5) с                         | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                    |
|                  | 108  | Стабилен                           | 26,46 (9)                                                                            | —                                             | —                                    |
|                  | 109  | 13,46 (2) ч                        | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,028                                         | 0,088 (5); 0,60 (0,03)               |
|                  | 109m | 4,69 (1) мин                       | и. п.                                                                                | —                                             | 0,189                                |
|                  | 110  | Стабилен                           | 11,72 (9)                                                                            | —                                             | —                                    |
|                  | 111  | 23,4 (2) мин                       | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,2                                           | 0,38/5/; 0,60*/13/; 1,4*/8/          |
|                  | 111m | 5,5 (1) ч                          | и. п. (71)                                                                           | —                                             | } 0,172                              |
|                  |      |                                    | β <sup>-</sup> (29)                                                                  | 2,0                                           |                                      |
|                  | 112  | 21,045 (40) ч                      | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,28                                          | 0,019 (20)                           |
|                  | 113  | 93 (5) с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,096; 0,222; 0,643; 0,739           |
|                  | 114  | 2,4 (1) мин                        | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,126; 0,136; 0,232; 0,358           |
|                  | 115  | 41 (3) с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,089; 0,255; 0,343                  |
|                  | 116  | 12,72 (44) с                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,115; 0,178                         |
|                  | 117  | 5,0 (6) с                          | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                    |
| <sup>47</sup> Ag | 98   | 44,5 (12) с                        | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | 0,571; 0,679; 0,863                  |
|                  | 99   | 1,8 мин                            | β <sup>+</sup>                                                                       | 4,2                                           | 0,264; 0,806; 0,832                  |
|                  | 100  | 2,3 (1) мин                        | β <sup>+</sup>                                                                       | 5,4                                           | 0,666; 1,694                         |

| Элемент          | A    | Период полураспада | Тип, распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                     |
|------------------|------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
|                  |      |                    |                                                                          | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                 |
|                  | 101  | 11,1 (3) мин       | $\beta^+$                                                                | 3,4; 2,7                                      | 0,261; 0,588; 0,667; 1,174          |
|                  | 102  | 12,9 (3) мин       | $\beta^+$                                                                | 2,3                                           | 0,56; 0,72; 0,84; 1,74              |
|                  | 102m | 7,7 (5) мин        | э. з. (51), и. п. (49)                                                   | —                                             | 0,009                               |
|                  | 103  | 65,7 (7) мин       | $\beta^+$                                                                | 1,6                                           | 0,12*/26/; 0,15/23/; 0,27/34/;      |
|                  | 103m | 5,7 (3) с          | э. з. (~ 70)                                                             | —                                             | 0,511/100, ан./                     |
|                  | 104  | 69,2 (10) мин      | и. п.                                                                    | —                                             | 0,134                               |
|                  | 104  | 69,2 (10) мин      | $\beta^+$                                                                | 0,99                                          | 0,556 (84); 0,764 (48); 0,854 (30)  |
|                  | 104  | 69,2 (10) мин      | э. з.                                                                    | —                                             |                                     |
|                  | 104m | 33,5 (20) мин      | $\beta^+$                                                                | 2,70                                          | 0,511 (120, ан.); 0,556 (100)       |
|                  | 105  | 41,29 (7) сут      | э. з., и. п. (33)                                                        | —                                             | 0,280 (32); 0,344** (42)            |
|                  | 105m | 7,23 мин           | э. з.                                                                    | —                                             | 0,025                               |
|                  | 106  | 24,0 (1) мин       | э. з., и. п. (99,7)                                                      | —                                             | 0,511 (140, ан.)                    |
|                  | 106m | 8,46 (10) сут      | $\beta^+$                                                                | 1,96                                          | 0,512 (86); 0,616 (23);             |
|                  | 106m | 8,46 (10) сут      | э. з.                                                                    | —                                             | 0,717** (31);                       |
|                  | 107  | Стабилен           | 51,839 (5)                                                               | —                                             | 0,80** (41); 1,046 (29)             |
|                  | 107m | 44,3 (2) с         | и. п.                                                                    | —                                             | —                                   |
|                  | 108  | 2,37 (1) мин       | $\beta^-$ (97,5)                                                         | 1,64                                          | 0,093 (5)                           |
|                  | 108  | 2,37 (1) мин       | э. з. (2,2)                                                              | —                                             | 0,434 (0,45); 0,511 (0,56, ан.);    |
|                  | 108  | 2,37 (1) мин       | $\beta^+$ (0,28)                                                         | 0,90                                          | 0,632 (1,7)                         |
|                  | 108m | 127 (21) лет       | э. з. (91)                                                               | —                                             | 0,079; 0,434 (89); 0,614 (90);      |
|                  | 109  | Стабилен           | 48,161 (5)                                                               | —                                             | 0,723 (90)                          |
|                  | 110  | 24,6 (2) с         | и. п. (9)                                                                | —                                             | —                                   |
|                  | 110  | 24,6 (2) с         | $\beta^-$ (99,7)                                                         | 2,87                                          | 0,658 (4,5)                         |
|                  | 110  | 24,6 (2) с         | э. з. (0,3)                                                              | —                                             |                                     |
|                  | 110m | 249,76 (4) сут     | $\beta^-$ (98,5)                                                         | 1,5 (0,6); 0,53 (31);                         | 0,658 (96); 0,764 (23); 0,885 (71); |
|                  | 110m | 249,76 (4) сут     | и. п.                                                                    | 0,087                                         | 0,937 (32); 1,384 (21)              |
|                  | 111  | 7,45 (1) сут       | $\beta^-$                                                                | 1,05                                          | 0,247 (1); 0,342 (6)                |
|                  | 111m | 64,8 (8) с         | и. п. (99,7);                                                            | —                                             | 0,060                               |
|                  | 111m | 64,8 (8) с         | $\beta^-$ (0,3)                                                          | —                                             |                                     |
|                  | 112  | 3,14 (2) ч         | $\beta^-$                                                                | 3,94                                          | 0,617 (41); 1,40 (5)                |
|                  | 113  | 5,37 (5) ч         | $\beta^-$                                                                | 2,0                                           | 0,12/10/; 0,30/100/; 0,67/17/       |
|                  | 113m | 68,7 (50) с        | $\beta^-$                                                                | 1,9; 1,5                                      | 0,043; 0,299; 0,316; 0,392          |
|                  | 114  | 4,6 (2) с          | $\beta^-$                                                                | 4,9                                           | 0,57                                |
|                  | 115  | 20,0 (5) мин       | $\beta^-$                                                                | 3,2                                           | 0,14** (12); 0,22** (49);           |
|                  | 116  | 2,68 (1) мин       | $\beta^-$                                                                | 5,0                                           | 0,28 (13); 1,48 (11); 2,12 (13)     |
|                  | 116m | 10,4 (8) с         | $\beta^-$ (~ 98),                                                        | —                                             | 0,52; 0,70                          |
|                  | 116m | 10,4 (8) с         | и. п. (~ 2)                                                              | —                                             | 0,081; 0,514; 0,706; 1,030          |
|                  | 117  | 72,8 (10) с        | $\beta^-$                                                                | —                                             | 0,135; 0,338                        |
|                  | 118  | 3,7 с              | $\beta^-$                                                                | —                                             | 0,488; 0,677                        |
|                  | 118m | 2,8 (3) с          | $\beta^-$ (59), и. п. (41)                                               | —                                             | 0,128                               |
|                  | 119  | 2,1 (1) с          | $\beta^-$                                                                | —                                             | 0,366; 0,399; 0,626                 |
|                  | 120  | 1,17 (5) с         | $\beta^-$                                                                | —                                             | 0,506; 0,698                        |
|                  | 120m | 0,32 (4) с         | $\beta^-$ (~ 63),                                                        | —                                             | 0,203; 0,506; 0,698; 0,926          |
|                  | 120m | 0,32 (4) с         | и. п. (~ 37)                                                             | —                                             |                                     |
|                  | 121  | 0,8 (1) с          | $\beta^-$                                                                | —                                             | 0,315; 0,354                        |
|                  | 123  | 0,39 (3) с         | $\beta^-$ , $\beta^-n$                                                   | —                                             | —                                   |
| <sup>48</sup> Cd | 100  | 1,1 (3) мин        | $\beta^+$                                                                | —                                             | 0,124—0,935                         |
|                  | 101  | 1,2 (2) мин        | э. з., $\beta^+$                                                         | —                                             | 0,098; 0,925; 1,26; 1,72            |
|                  | 102  | 5,5 (5) мин        | э. з., $\beta^+$                                                         | —                                             | 0,415; 0,481; 0,505; 1,037          |
|                  | 103  | 7,3 (1) мин        | э. з., $\beta^+$                                                         | —                                             | 0,22; 0,511 (ан.); 0,63; 0,85       |
|                  | 104  | 57,7 (10) мин      | э. з., $\beta^+$                                                         | —                                             | 0,084; 0,709                        |
|                  | 105  | 55,5 (4) мин       | э. з.                                                                    | —                                             | 0,308; 0,320; 0,347; 0,433;         |
|                  | 105  | 55,5 (4) мин       | $\beta^+$                                                                | 1,69                                          | 0,511 (ан.);                        |
|                  | 106  | Стабилен           | 1,25 (3)                                                                 | —                                             | 0,607; 0,962; 1,302; 1,693          |



| Эле-<br>мент     | A                 | Период полураспада                   | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                   |
|------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|                  |                   |                                      |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                       |
| <sup>49</sup> In | 107               | 6,50 (2) ч                           | э. з. (> 99)<br>β <sup>+</sup> (0,28)                                                | —<br>0,302                                    | } 0,511 (0,56, ан.); 0,796 (0,08);<br>0,829 (0,21)                |
|                  | 108               | Стабилен                             | 0,89 (1)                                                                             | —                                             |                                                                   |
|                  | 109               | 464 (1) сут                          | э. з.                                                                                | —                                             | 0,088 (4)                                                         |
|                  | 110               | } Стабилен                           | 12,49 (9)                                                                            | —                                             | —                                                                 |
|                  | 111               |                                      | 12,80 (6)                                                                            | —                                             | —                                                                 |
|                  | 111m              | 48,6 (3) мин                         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,150 (30); 0,247 (94) 0,396                                      |
|                  | 112               | Стабилен                             | 24,13 (11)                                                                           | —                                             | —                                                                 |
|                  | 113               | 9,3 (19) ×<br>× 10 <sup>15</sup> лет | 12,22 (6)                                                                            | —                                             | —                                                                 |
|                  | 113m              | 14,1 (5) года                        | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                                 |
|                  |                   |                                      | β <sup>-</sup> (99,9)<br>и. п. (0,1)                                                 | 0,58                                          | } 0,264                                                           |
|                  | 114               | Стабилен                             | 28,73 (21)                                                                           | —                                             | —                                                                 |
|                  | 115               | 53,46 (10) ч                         | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,11                                          | 0,262 (2); 0,49 (10); 0,53 (26)                                   |
|                  | 115m              | 44,6 (3) сут                         | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,62                                          | 0,485 (0,3); 0,935 (1,9);<br>1,29 (0,9)                           |
|                  | 116               | Стабилен                             | 7,49 (9)                                                                             | —                                             | —                                                                 |
|                  | 117               | 2,49 (4) ч                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,23                                          | 0,273 (31); 0,345 (18);<br>0,434 (13); 1,303 (19);<br>1,577 (17)  |
|                  | 117m              | 3,36 (5) ч                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,67                                          | 0,273 (18); 0,880 (10);<br>1,24** (11); 1,433 (10);<br>1,998 (15) |
|                  | 118               | 50,3 (2) мин                         | β <sup>-</sup>                                                                       | ~0,8                                          | —                                                                 |
|                  | 119               | 2,69 (2) мин                         | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,293; 0,343                                                      |
|                  | 119m              | 2,20 (2) мин                         | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,146; 1,025; 2,021                                               |
|                  | 120               | 50,80 (21) с                         | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                                 |
|                  | 121               | 13,5 (3) с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,324; 0,349; 1,041                                               |
|                  | 126               | 0,506 (15) с                         | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,260; 0,428                                                      |
|                  | 128               | 0,94 (5) с                           | —                                                                                    | —                                             | —                                                                 |
|                  | 102               | 23 (4) с                             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,593; 0,777; 0,861                                               |
|                  | 103               | 65 (7) с                             | β <sup>+</sup>                                                                       | 4,4                                           | 0,188; 0,202; 0,720; 0,740                                        |
|                  | 104               | 25 (6) мин                           | —                                                                                    | —                                             | —                                                                 |
|                  | 105               | 5,1 (3) мин                          | β <sup>+</sup>                                                                       | 3,9                                           | 0,131; 0,260; 0,604                                               |
|                  | 106               | 6,2 (1) мин                          | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,0                                           | 0,511 (ан.); 0,63; 1,65; 1,85                                     |
|                  | 107               | 32,4 (3) мин                         | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,2                                           | } 0,22 (46); 0,511 (ан.)                                          |
|                  | 107m              | 50,4 (6) с                           | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                   |
|                  |                   |                                      | и. п.                                                                                | —                                             | 0,678                                                             |
|                  | 108               | 57 мин                               | β <sup>+</sup>                                                                       | 1,29                                          | } 0,150; 0,175; 0,243;<br>0,511 (ан.); 0,633; 0,872               |
|                  | 109               | 4,2 (1) ч                            | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                   |
|                  |                   |                                      | β <sup>+</sup> (94)<br>β <sup>+</sup> (6)                                            | —<br>0,79                                     | } 0,205; 0,28**; 0,35**; 0,65**;<br>0,91**                        |
|                  | 109m <sub>1</sub> | 1,34 (7) мин                         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,650                                                             |
|                  | 109m <sub>2</sub> | 0,21 (1) с                           | и. п.                                                                                | —                                             | 0,40 (20); 0,68 (100); 1,04 (20);<br>1,43 (77)                    |
|                  | 110               | 66 мин                               | β <sup>+</sup> (71)<br>э. з. (29)                                                    | 2,25                                          | } 0,511 (142, ан.); 0,658 (95);<br>0,885; 0,937                   |
|                  | 111               | 2,83 (1) сут                         | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                   |
|                  | 111m              | 7,7 (2) мин                          | и. п.                                                                                | —                                             | 0,173 (89); 0,247 (94)                                            |
|                  | 112               | 14,4 (2) мин                         | β <sup>-</sup> (44)<br>β <sup>+</sup> (22)                                           | 0,66<br>1,56                                  | } 0,511 (44, ан.); 0,617 (6)                                      |
|                  | 112m              | 20,9 (2) мин                         | э. з. (34)                                                                           | —                                             |                                                                   |
|                  |                   |                                      | и. п.                                                                                | —                                             | 0,156 (9)                                                         |
|                  | 113               | Стабилен                             | 4,3 (2)                                                                              | —                                             | —                                                                 |
|                  | 113m              | 1,658 (1) ч                          | и. п.                                                                                | —                                             | 0,392                                                             |
|                  | 114               | 71,9 (1) с                           | β <sup>-</sup> (98)<br>э. з. (1,9)<br>β <sup>+</sup> (0,004)                         | 1,988<br>—<br>0,42                            | } 1,299 (0,17)                                                    |
|                  | 114m              | 49,51 (1) сут                        | и. п. (96,7)<br>э. з. (3,3)                                                          | —<br>—                                        |                                                                   |
|                  | 114m              | 49,51 (1) сут                        |                                                                                      |                                               | } 0,190 (17); 0,558 (3,5);<br>0,724 (3,5)                         |
|                  |                   |                                      |                                                                                      |                                               |                                                                   |

| Эле-<br>мент     | A                 | Период полураспада       | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                              |
|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                   |                          |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                                  |
| $^{60}\text{Sn}$ | 115               | $4,41 \cdot 10^{14}$ лет | 95,7 (2)<br>β <sup>-</sup>                                                           | —<br>0,48                                     | —<br>—                                                                                       |
|                  | 115m              | 4,486 (4) ч              | и. п. (95)<br>β <sup>-</sup> (5)                                                     | —<br>0,83                                     | } 0,336                                                                                      |
|                  | 116               | 14,10 (3) с              | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,3                                           |                                                                                              |
|                  | 116m <sub>1</sub> | 54,15 (6) мин            | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,00                                          | 0,434 (0,12); 0,95 (0,1);<br>1,293 (1,2)<br>0,417 (36); 1,09 (53); 1,293 (80);<br>2,111 (20) |
|                  | 116m <sub>2</sub> | 2,18 (4) с               | и. п.                                                                                | —                                             | 0,164; 0,290                                                                                 |
|                  | 117               | 43,8 (7) мин             | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,74                                          | 0,158(87); 0,565 (100)                                                                       |
|                  | 117m              | 116,5 (7) мин            | и. п. (47)<br>β <sup>-</sup> (53)                                                    | —<br>1,78                                     | } 0,158 (14); 0,315 (31)                                                                     |
|                  | 118               | 5,0 (3) с                | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,2                                           |                                                                                              |
|                  | 119               | 2,4 (1) мин              | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,6                                           | 1,230 (15)                                                                                   |
|                  | 119m              | 18,0 (3) мин             | β <sup>-</sup> (95)<br>и. п. (5)                                                     | 2,7<br>—                                      | } 0,82 (95)<br>0,024; 0,311; 0,91*                                                           |
|                  | 120               | 3,2 с                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,3                                           |                                                                                              |
|                  | 121               | 23,1 (6) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,5                                           | 1,171 (15)                                                                                   |
|                  | 121m              | 3,88 (10) мин            | β <sup>-</sup> (98,8), н. п. (1,2)                                                   | —                                             | 0,262; 0,657; 0,926                                                                          |
|                  | 122               | 10,0 (5) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 5                                             | 0,314                                                                                        |
|                  | 123               | 5,98 (6) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,3                                           | 0,99; 1,14                                                                                   |
|                  | 123m              | 47,8 (5) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,5                                           | 1,020; 1,131                                                                                 |
|                  | 124               | 3,21 (6) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,9                                           | 0,126                                                                                        |
|                  | 125               | 2,33 (4) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,3; 4,1                                      | 0,99/3/; 1,13/10/; 3,21/3/                                                                   |
|                  | 126               | 1,45 (22) с              | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,2                                           | 1,032; 1,335                                                                                 |
|                  | 127               | 1,15 (5) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,8; 4,9                                      | 0,909; 1,141                                                                                 |
|                  | 128               | 0,9 (1) с                | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,0                                           | 1,598                                                                                        |
|                  | 129               | 0,59 (2) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | 6,8; 5,5                                      | 1,169; 3,520                                                                                 |
|                  | 130               | 0,53 (5) с               | β <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> n                                                    | —                                             | 1,865; 2,119                                                                                 |
|                  | 106               | 2,10 (15) мин            | э. з.                                                                                | —                                             | 0,774; 1,221                                                                                 |
|                  | 107               | 2,90 (5) мин             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,253; 0,387; 0,477                                                                          |
|                  | 108               | 10,30 (8) мин            | э. з.                                                                                | —                                             | 1,129                                                                                        |
|                  | 109               | 18,0 (2) мин             | э. з.<br>β <sup>+</sup>                                                              | —<br>2,5                                      | 0,28; 0,42; 0,67                                                                             |
|                  | 110               | 4,11 (10) ч              | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,335; 0,521; 0,89; 1,12; 1,32;<br>1,46                                                    |
|                  | 111               | 35,3 (8) мин             | э. з. (73)<br>β <sup>+</sup> (27)                                                    | —<br>1,51                                     |                                                                                              |
|                  | 112               | Стабилен                 | 0,97 (1)                                                                             | —                                             | 0,283 (95)                                                                                   |
|                  | 113               | 115,09 (4) сут           | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,511 (54, ан.); 0,75 (1,1);<br>1,14 (1,8); 1,89 (1,0); 1,92                               |
|                  | 113m              | 21,4 (4) мин             | и. п. (91), э. з. (9)                                                                | —                                             |                                                                                              |
|                  | 114               | } Стабилен               | 0,65 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 115               |                          | 0,36 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 116               |                          | 14,53 (11)                                                                           | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 117               |                          | 7,68 (7)                                                                             | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 117m              | 13,61 (4) сут            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,158 (87); 0,315                                                                            |
|                  | 118               | } Стабилен               | 24,22 (11)                                                                           | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 119               |                          | 8,58 (4)                                                                             | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 119m              | 293,0 (13) сут           | и. п.                                                                                | —                                             | 0,024 (16); 0,090                                                                            |
|                  | 120               | Стабилен                 | 32,59 (10)                                                                           | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 121               | 27,06 (4) ч              | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,383                                         | —                                                                                            |
|                  | 121m              | 55 (5) лет               | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,42                                          | 0,037                                                                                        |
|                  | 122               | Стабилен                 | 4,63 (3)                                                                             | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 123               | 129,2 (4) сут            | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,42                                          | —                                                                                            |
|                  | 123m              | 40,08 (7) мин            | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,26                                          | 0,160                                                                                        |
|                  | 124               | Стабилен                 | 5,79 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                                            |
|                  | 125               | 9,64 (3) сут             | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,34                                          | 0,811 (1,5); 0,904 (1,4);<br>1,068 (4); 1,97 (0,6)                                           |
|                  | 125m              | 9,52 (5) мин             | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,04                                          | 0,325 (97)                                                                                   |
|                  | 126               | ~ 1·10 <sup>5</sup> лет  | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,3                                           | 0,060; 0,067; 0,092                                                                          |
|                  | 127               | 2,10 (4) ч               | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,2                                           | 0,823; 1,096; 1,114                                                                          |
|                  | 127m              | 4,13 (3) мин             | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,7                                           | 0,49 (100)                                                                                   |
|                  | 128               | 59,1 (5) мин             | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,80                                          | 0,044 (7); 0,072 (19); 0,50 (61);<br>0,57 (22)                                               |

| Элемент          | A                 | Период полураспада | Тип распада или относительная распространенность с стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                      |
|------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
|                  |                   |                    |                                                                           | групп частиц                                  | γ-излучения                          |
| $_{51}\text{Sb}$ | 128m              | 6,5 (5) с          | и. п.                                                                     | —                                             | 0,832; 1,169                         |
|                  | 129               | 2,16 (4) мин       | $\beta^-$                                                                 | 3,3                                           | 0,642; 2,100                         |
|                  | 129m              | 6,7 (4) мин        | и. п., $\beta^-$                                                          | —                                             | —                                    |
|                  | 130               | 3,72 (11) мин      | $\beta^-$                                                                 | 1,5; 1,1                                      | 0,192; 0,780                         |
|                  | 130m              | 1,7 (1) мин        | $\beta^-$                                                                 | —                                             | 0,084; 0,145; 0,311; 0,899           |
|                  | 131               | 61 (3) с           | $\beta^-$                                                                 | 3,4                                           | 0,305; 0,450; 1,23                   |
|                  | 132               | 40 (1) с           | $\beta^-$                                                                 | 1,8                                           | 0,085; 0,247; 0,340; 0,899           |
|                  | 134               | 1,04 (2) с         | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (~ 17)                                             | —                                             | 0,992                                |
|                  | 109               | 18,3 (5) с         | $\beta^+$                                                                 | 5,4; 4,4                                      | 0,925; 1,062; 1,496                  |
|                  | 110               | 23,0 (4) с         | $\beta^+$                                                                 | 6,9                                           | 0,827; 0,985; 1,212; 1,243           |
|                  | 111               | 75 (1) с           | $\beta^+$                                                                 | 3,3                                           | 0,154; 0,489                         |
|                  | 112               | 51,4 (5) с         | $\beta^+$                                                                 | 4,8                                           | 0,511 (ан.); 1,26                    |
|                  | 113               | 6,67 (7) мин       | э. з.                                                                     | —                                             | } 0,32; 0,511 (ан.); 1,03; 1,2*      |
|                  |                   |                    | $\beta^+$                                                                 | 2,42                                          |                                      |
|                  | 114               | 3,49 (3) мин       | э. з.                                                                     | —                                             | } 0,9;                               |
|                  |                   |                    | $\beta^+$                                                                 | 4,0                                           |                                      |
|                  | 115               | 32,1 (3) мин       | э. з. (67)                                                                | —                                             | } 1,30                               |
|                  |                   |                    | $\beta^+$ (33)                                                            | 1,5                                           |                                      |
|                  | 116               | 15,8 (8) мин       | э. з. (72)                                                                | —                                             | } 0,499 (100); 0,511 (67, ан.);      |
|                  |                   |                    | $\beta^+$ (28)                                                            | 2,3                                           |                                      |
|                  | 116m              | 60,3 (6) мин       | э. з. (81)                                                                | —                                             | } 0,98 (5); 1,24 (5)                 |
|                  |                   |                    | $\beta^+$ (19)                                                            | 1,16                                          |                                      |
|                  | 117               | 2,80 (1) ч         | э. з. (97,4)                                                              | —                                             | } 0,511 (56, ан.); 0,93 (26);        |
|                  |                   |                    | $\beta^+$ (2,6)                                                           | 0,57                                          |                                      |
|                  | 118               | 3,6 (1) мин        | э. з.                                                                     | —                                             | } 1,293 (85); 2,23 (14)              |
|                  |                   |                    | $\beta^+$                                                                 | 2,67                                          |                                      |
|                  | 118m              | 5,00 (1) ч         | э. з. (> 99)                                                              | —                                             | } 0,041 (29); 0,254 (93);            |
|                  |                   |                    | $\beta^+$ (0,16)                                                          | —                                             |                                      |
|                  | 119               | 38,1 (2) ч         | э. з.                                                                     | —                                             | } 1,049 (100); 1,230 (100)           |
|                  | 120               | 15,89 (4) мин      | $\beta^+$                                                                 | 1,70                                          |                                      |
|                  | 121               | Стабилен           | э. з.                                                                     | —                                             | } 0,024 (16)                         |
|                  | 122               | 2,70 (1) сут       | 57,3 (9)                                                                  | —                                             |                                      |
|                  |                   |                    | $\beta^-$ (97)                                                            | 2,0; 1,4                                      | } 0,511 (87, ан.); 1,171 (1,3)       |
|                  |                   |                    | э. з. (3)                                                                 | —                                             |                                      |
|                  |                   |                    | $\beta^+$ (0,006)                                                         | 0,56                                          | } 0,564 (66); 0,686 (3,4)            |
|                  | 123               | Стабилен           | 42,7 (9)                                                                  | —                                             |                                      |
|                  | 124               | 60,20 (3) сут      | $\beta^-$                                                                 | 2,31                                          | } —                                  |
|                  | 124m <sub>1</sub> | 93 (5) с           | и. п. (80)                                                                | —                                             |                                      |
|                  |                   |                    | $\beta^-$ (20)                                                            | 1,19                                          | } 0,603 (97); 0,72*(14); 1,691 (50)  |
|                  | 124m <sub>2</sub> | 20,2 (2) мин       | и. п.                                                                     | —                                             |                                      |
|                  | 125               | 2,73 (3) года      | $\beta^-$                                                                 | 0,61                                          | } 0,505 (20); 0,603 (20); 0,644 (20) |
|                  |                   |                    | $\beta^-$                                                                 | 1,9                                           |                                      |
|                  | 126               | 12,4 (1) сут       | $\beta^-$                                                                 | —                                             | } 0,035                              |
|                  | 126m              | 19,0 (3) мин       | $\beta^-$ (86), и. п. (14)                                                | —                                             |                                      |
|                  | 127               | 3,85 (5) сут       | $\beta^-$                                                                 | 1,5                                           | } 0,427 (31); 0,463 (10);            |
|                  | 128               | 9,01 (3) ч         | $\beta^-$                                                                 | 2,0                                           |                                      |
|                  | 129               | 4,40 (1) ч         | $\beta^-$                                                                 | 2,2; 0,6                                      | } 0,599*(24); 0,634 (11)             |
|                  | 130               | 40 (1) мин         | $\beta^-$                                                                 | 2,9                                           |                                      |
|                  | 130m              | 6,3 (2) мин        | $\beta^-$                                                                 | 3,2; 2,2                                      | } 0,41; 0,69**                       |
|                  | 131               | 23 (2) мин         | $\beta^-$                                                                 | 3,0; 1,3                                      |                                      |
|                  | 132               | 4,2 (1) мин        | $\beta^-$                                                                 | 3,7                                           | } 0,018                              |
|                  | 133               | 2,7 (1) мин        | $\beta^-$                                                                 | 2,4; 1,2                                      |                                      |
|                  | 135               | ~ 2 с              | $\beta$ , $\beta^-n$ (20)                                                 | —                                             | } 0,46; 0,68; 0,77                   |
|                  | 136               | 0,82 (2) с         | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (32)                                               | —                                             |                                      |

| Элемент          | A    | Период полураспада               | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                      |
|------------------|------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                  |      |                                  |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                          |
| <sup>52</sup> Te | 108  | 2,1 (1) с                        | α                                                                       | 3,32                                          | —                                                    |
|                  | 109  | 4,6 (3) с                        | э. з., p                                                                | 2,6; 3,4; 3,7                                 | —                                                    |
|                  | 110  | 18,6 (8) с                       | β <sup>+</sup> , β <sup>+</sup> p, α                                    | —                                             | —                                                    |
|                  | 111  | 19,3 (4) с                       | β <sup>+</sup> , α                                                      | —                                             | 0,108; 0,219; 0,606; 0,895                           |
|                  | 112  | 2,0 (2) мин                      | β <sup>+</sup> , β <sup>+</sup> p                                       | —                                             | 0,851; 0,881; 1,268; 1,392                           |
|                  | 113  | 1,7 (2) мин                      | β <sup>+</sup>                                                          | —                                             | 0,296; 0,373; 0,419                                  |
|                  | 114  | 15,2 (7) мин                     | β <sup>+</sup>                                                          | 4,7                                           | 0,645; 0,814; 1,018; 1,181                           |
|                  | 115  | 5,8 (2) мин                      | э. з. (~ 20)                                                            | —                                             | 0,84; 0,90; 0,245; 0,727; 1,897                      |
|                  | 115m | 6,7 (4) мин                      | β <sup>+</sup> (~ 80)                                                   | 2,8                                           | 0,511 (160, ан.); 0,72 (34); 1,28 (32); 1,38 (32)    |
|                  | 116  | 2,49 (4) ч                       | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                    |
|                  | 117  | 62 (2) мин                       | э. з. (70)                                                              | —                                             | 0,094; 0,103                                         |
|                  | 117m | 0,103 (3) с                      | β <sup>+</sup> (30)                                                     | 1,81                                          | 0,511 (60, ан.); 0,72 (65); 0,93 (6); 1,78 (9)       |
|                  | 118  | 6,00 (2) сут                     | и. п.                                                                   | —                                             | —                                                    |
|                  | 119  | 16,05 (5) ч                      | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                    |
|                  | 119m | 4,69 (4) сут                     | β <sup>+</sup> (5)                                                      | 0,627                                         | 0,645 (85); 0,70 (11); 1,76 (3,6)                    |
|                  | 120  | Стабилен                         | β <sup>+</sup>                                                          | —                                             | 0,153 (62); 0,270 (25); 1,221 (67); 2,09 (4)         |
|                  | 121  | 16,78 (35) сут                   | 0,096 (2)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 121m | 154 (7) сут                      | э. з.                                                                   | —                                             | 0,508 (18); 0,573 (80)                               |
|                  | 122  | Стабилен                         | и. п. (90)                                                              | —                                             | 0,212 (82); 1,10 (3)                                 |
|                  | 123  | > 1·10 <sup>13</sup> лет         | э. з. (10)                                                              | —                                             | —                                                    |
|                  | 123m | 119,7 (1) сут                    | 2,60 (1)                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 124  | } Стабилен                       | 0,808 (3)                                                               | —                                             | 0,159 (84)                                           |
|                  | 125  |                                  | и. п.                                                                   | —                                             | —                                                    |
|                  | 125m |                                  | 4,816 (8)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 126  | 58 (1) сут                       | 7,14 (1)                                                                | —                                             | 0,035 (7); 0,110 (0,3)                               |
|                  | 126  | Стабилен                         | и. п.                                                                   | —                                             | —                                                    |
|                  | 127  | 9,35 (7) ч                       | 18,95 (1)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 127m | 109 (2) сут                      | β <sup>-</sup>                                                          | 0,70                                          | 0,058 (0,01); 0,21*(0,03); 0,360 (0,05); 0,417 (0,3) |
|                  | 128  | > 8·10 <sup>24</sup> лет         | и. п. (97,6), β <sup>-</sup> (2,4)                                      | —                                             | 0,059 (0,19); 0,088 (0,08); 0,67 (0,004)             |
|                  | 129  | 69,6 (3) мин                     | 31,69 (2)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 129m | 33,6 (1) сут                     | β <sup>-</sup>                                                          | 1,45                                          | 0,027 (19); 0,455 (15)                               |
|                  | 130  | 2,51 (27) × 10 <sup>21</sup> лет | и. п. (63)                                                              | 1,60                                          | 0,69; 0,106                                          |
|                  | 131  | 25,0 (1) мин                     | β <sup>-</sup> (37)                                                     | —                                             | —                                                    |
|                  | 131m | 30 (2) ч                         | 33,80 (2)                                                               | —                                             | —                                                    |
|                  | 132  | 78,2 (8) ч                       | β <sup>-</sup>                                                          | 2,14                                          | 0,150 (68); 0,453 (16)                               |
|                  | 133  | 12,45 (28) мин                   | β <sup>-</sup> (78)                                                     | 2,46 (5); 0,9                                 | 0,78**(60); 0,85*(31); 1,127 (13); 1,206 (11)        |
|                  | 133m | 55,4 (4) мин                     | и. п. (22)                                                              | —                                             | 0,053 (17); 0,230 (90)                               |
|                  | 134  | 41,8 (8) мин                     | β <sup>-</sup>                                                          | 0,22                                          | 0,312; 0,408; 1,333                                  |
|                  | 135  | 18 (1) с                         | β <sup>-</sup> (83)                                                     | 3,2; 2,8                                      | 0,432 (50); 0,557 (35); 0,754 (85); 0,91 (57)        |
|                  | 136  | 20,7 (20) с                      | и. п. (17)                                                              | —                                             | 0,08 (13); 0,17 (16); 0,204 (21); 0,262 (19)         |
|                  | 137  | 3,5 (5) с                        | β <sup>-</sup>                                                          | 0,7                                           | 0,267; 0,604; 0,870                                  |
|                  | 138  | 1,4 (4) с                        | β <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> n (0,7)                                 | 6,0; 5,4                                      | —                                                    |
|                  | 138  |                                  | β <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> n (2,5)                                 | —                                             | 0,244                                                |
|                  | 138  |                                  | β <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> n (6)                                   | —                                             | —                                                    |
| <sup>53</sup> I  | 111  | 2,5 (2) с                        | α                                                                       | 3,152                                         | 0,117; 0,321; 0,341; 0,266                           |
|                  | 112  | 3,42 (11) с                      | β <sup>+</sup> , α                                                      | —                                             | 0,689; 0,787; 0,795; 1,143                           |
|                  | 114  | 2,1 (2) с                        | β <sup>+</sup>                                                          | 6,5                                           | 0,682; 0,709; 0,775; 1,091                           |
|                  | 115  | 1,3 (2) мин                      | β <sup>+</sup>                                                          | —                                             | —                                                    |
|                  | 116  | 2,91 (15) с                      | β <sup>+</sup>                                                          | 6,7                                           | 0,540; 0,679                                         |
|                  | 117  | 2,3 (1) мин                      | β <sup>+</sup>                                                          | 3,5                                           | 0,16; 0,34; 0,511 (ан.)                              |
|                  | 118  | 13,7 (5) мин                     | β <sup>+</sup> (~ 54)                                                   | 5,5                                           | 0,511 (108, ан.); 0,55; 0,60; 1,15; 1,34             |
|                  | 118  |                                  | э. з. (~ 46)                                                            | —                                             | —                                                    |

| Элемент          | A    | Период полураспада                     | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                        |
|------------------|------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                                        |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                                    |
| <sup>54</sup> Xe | 118m | 8,5 (5) мин                            | э. з., и. п.                                                            | —                                             | 0,104; 0,60                                                            |
|                  | 119  | 19,1 (4) мин                           | э. з. (49)<br>$\beta^+$ (51)                                            | —<br>2,4                                      | } 0,26; 0,511 (102, ан.); 0,78                                         |
|                  | 120  | 81,0 (6) мин                           | э. з. (54)<br>$\beta^+$ (46)                                            | —<br>4,6                                      | } 0,511 (92, ан.); 0,56; 0,62;<br>1,52                                 |
|                  | 120m | 53 (4) мин                             | $\beta^+$                                                               | 3,8                                           | 0,56; 0,60; 0,61                                                       |
|                  | 121  | 2,12 (1) ч                             | э. з. (91)<br>$\beta^+$ (9)                                             | —<br>1,2                                      | } 0,212 (90); 0,32 (6);<br>0,511 (18, ан.)                             |
|                  | 122  | 3,62 (6) мин                           | $\beta^+$                                                               | 3,1                                           | 0,511 (ан.); 0,564; 0,69; 0,78                                         |
|                  | 123  | 13,2 (1) ч                             | э. з.                                                                   | —                                             | 0,159 (83)                                                             |
|                  | 124  | 4,18 (2) сут                           | э. з. (74)<br>$\beta^+$ (26)                                            | —<br>2,14                                     | } 0,511 (50, ан.); 0,605 (67);<br>0,644 (12); 0,73 (14); 1,69 (14)     |
|                  | 125  | 60,14 (11) сут                         | э. з.                                                                   | —                                             | 0,035 (7)                                                              |
|                  | 126  | 13,02 (7) сут                          | э. з. (55)<br>$\beta^-$ (44)<br>$\beta^+$ (1,3)                         | —<br>1,25<br>1,13                             | } 0,386 (34); 0,667 (33)                                               |
|                  | 127  | Стабилен                               | 100                                                                     | —                                             | —                                                                      |
|                  | 128  | 24,99 (2) мин                          | $\beta^-$ (93,6)<br>э. з. (6,4)                                         | 2,12<br>—                                     | } 0,441 (14); 0,528 (1,4)                                              |
|                  | 129  | 1,57 (4) $\times$<br>$\times 10^7$ лет | $\beta^-$                                                               | 0,150                                         | 0,040 (9)                                                              |
|                  | 130  | 12,36 ч                                | $\beta^-$                                                               | 1,7 (0,4); 1,04                               | 0,419 (35); 0,538 (99);<br>0,669 (100); 0,743 (87)                     |
|                  | 130m | 9,0 (1) мин                            | и. п. (83), $\beta^-$ (17)                                              | —                                             | 0,048; 0,536                                                           |
|                  | 131  | 8,04 (1) сут                           | $\beta^-$                                                               | 0,806 (0,6); 0,606                            | 0,284 (5,4); 0,364 (82);<br>0,637 (6,8)                                |
|                  | 132  | 2,30 (3) ч                             | $\beta^-$                                                               | 2,12                                          | 0,52** (20); 0,67** (144);<br>0,773 (89); 0,955 (22)                   |
|                  | 132m | 83,6 (7) мин                           | и. п. (86), $\beta^-$ (14)                                              | —                                             | 0,175; 0,60; 0,67; 0,77                                                |
|                  | 133  | 20,8 (1) ч                             | $\beta^-$                                                               | 1,27                                          | 0,53 (90)                                                              |
|                  | 133m | 9 с                                    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,073; 0,647; 0,913                                                    |
|                  | 134  | 52,6 (4) мин                           | $\beta^-$                                                               | 2,43                                          | 0,61 (18); 0,85 (95); 0,89 (65);<br>1,15 (10)                          |
|                  | 134m | 3,69 (7) мин                           | и. п. (98), $\beta^-$ (2)                                               | —                                             | 0,316; 0,847; 0,884                                                    |
|                  | 135  | 6,61 ч                                 | $\beta^-$                                                               | 2,2; 1,4                                      | 1,14 (37); 1,28 (34); 1,46 (12);<br>1,72 (19)                          |
|                  | 136  | 84 (1) с                               | $\beta^-$                                                               | 7,0 (6); 5,6                                  | 0,27 (18); 0,39 (19); 1,32** (95);<br>2,3** (19)                       |
|                  | 137  | 24,5 (2) с                             | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (6)                                              | —                                             | 0,601; 1,218                                                           |
|                  | 138  | 6,41 (6) с                             | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (5)                                              | —                                             | 0,484; 0,589; 0,875; 2,262                                             |
|                  | 139  | 2,30 (5) с                             | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (10)                                             | —                                             | 0,528; 0,537; 0,571; 0,848                                             |
|                  | 140  | 0,86 (4) с                             | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (14)                                             | —                                             | 0,377; 0,458                                                           |
|                  | 141  | 0,41 (8) с                             | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,192; 0,303; 0,387; 0,579                                             |
|                  | 112  | 2,8 (2) с                              | $\alpha$                                                                | 3,210                                         | —                                                                      |
|                  | 114  | 10,0 (4) с                             | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,104; 0,162; 0,309; 0,440                                             |
|                  | 116  | 56 (2) с                               | $\beta^+$                                                               | 3,3                                           | 0,248; 0,311                                                           |
|                  | 117  | 61 (2) с                               | $\beta^+$ , $\beta^+p$ (0,003)                                          | —                                             | 0,221; 0,295; 0,519; 0,661                                             |
|                  | 119  | 5,8 (3) мин                            | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,10; 0,23; 0,46                                                       |
|                  | 120  | 40 (1) мин                             | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,055; 0,073; 0,176; 0,76                                              |
|                  | 121  | 40,1 (20) мин                          | $\beta^+$                                                               | 2,8                                           | 0,080; 0,096; 0,132; 0,437;<br>0,511 (ан.)                             |
|                  | 122  | 20,1 (1) ч                             | э. з.                                                                   | —                                             | 0,060; 0,090; 0,110; 0,148;<br>0,180; 0,345; 0,417                     |
|                  | 123  | 2,08 (2) ч                             | $\beta^+$ , э. з.                                                       | —                                             | 0,090; 0,110; 0,149; 0,178;<br>0,329; 0,511 (ан.);<br>0,68; 0,90; 1,10 |
|                  | 124  | Стабилен                               | 0,10 (1)                                                                | —                                             | —                                                                      |
|                  | 125  | 16,9 (2) ч                             | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | 0,055; 0,188; 0,242                                                    |
|                  | 125m | 57 (1) с                               | и. п.                                                                   | —                                             | 0,075; 0,111; 0,140                                                    |
|                  | 126  | Стабилен                               | 0,09 (1)                                                                | —                                             | —                                                                      |
|                  | 127  | 36,4 (1) сут                           | э. з.                                                                   | —                                             | 0,172 (22); 0,203 (65); 0,375 (20)                                     |

| Эле-<br>мент     | A    | Период полураспада      | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                      |
|------------------|------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                  |      |                         |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                          |
| <sup>55</sup> Cs | 127m | 69,2 (9) с              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,125; 0,175                                         |
|                  | 128  | } Стабилен              | 1,91 (3)                                                                             | —                                             | —                                                    |
|                  | 129  |                         | 26,4 (6)                                                                             | —                                             | —                                                    |
|                  | 129m | 8,89 (2) сут            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,040 (9); 0,197 (6)                                 |
|                  | 130  | } Стабилен              | 4,1 (1)                                                                              | —                                             | —                                                    |
|                  | 131  |                         | 21,2 (4)                                                                             | —                                             | —                                                    |
|                  | 131m | 11,9 (1) сут            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,164 (2)                                            |
|                  | 132  | Стабилен                | 26,9 (5)                                                                             | —                                             | —                                                    |
|                  | 133  | 5,29 (1) сут            | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,346                                         | 0,081 (37)                                           |
|                  | 133m | 2,19 (1) сут            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,233 (14)                                           |
|                  | 134  | Стабилен                | 10,4 (2)                                                                             | —                                             | —                                                    |
|                  | 135  | 9,083 ч                 | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,92                                          | 0,250 (91); 0,61 (3)                                 |
|                  | 135m | 15,6 мин                | и. п. (> 99),<br>β <sup>-</sup> (0,004)                                              | —                                             | 0,527                                                |
|                  | 136  | Стабилен                | 8,9 (1)                                                                              | —                                             | —                                                    |
|                  | 137  | 3,818 (13) мин          | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,1                                           | 0,455 (33)                                           |
|                  | 138  | 14,08 (8) мин           | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,8                                           | 0,16/33/; 0,26/100/; 0,42/40/;<br>1,78/66/; 2,02/58/ |
|                  | 139  | 39,68 (14) с            | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,0                                           | 0,18/41/; 0,22/100/; 0,30/57/;<br>1,15/23/           |
|                  | 140  | 13,60 (10) с            | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,6                                           | 0,622; 0,806; 1,315; 1,414                           |
|                  | 141  | 1,72 (3) с              | β <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> n (0,05)                                             | —                                             | 0,106; 0,119; 0,909                                  |
|                  | 142  | 1,22 (2) с              | β <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> n (0,41)                                             | —                                             | 0,54; 0,57; 0,62; 0,66                               |
|                  | 144  | 1,15 (20) с             | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                    |
|                  | 145  | 0,9 (3) с               | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                    |
|                  | 117  | 8 (2) с                 | —                                                                                    | —                                             | —                                                    |
|                  | 118  | 16,4 (12) с             | β <sup>+</sup> , β <sup>+</sup> p (0,04)                                             | —                                             | —                                                    |
|                  | 120  | 60,2 (15) с             | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | 0,332                                                |
|                  | 121  | 125,6 (14) с            | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | —                                                    |
|                  | 122  | 4,5 (2) мин             | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 123  | 5,87 (5) мин            | β <sup>+</sup>                                                                       | 3,1                                           | 0,097; 0,597                                         |
|                  | 123m | 1,60 (15) с             | и. п.                                                                                | —                                             | 0,64; 0,95                                           |
|                  | 124  | 26,5 (15) с             | β <sup>+</sup>                                                                       | 4,9                                           | 0,354; 0,493; 0,915                                  |
|                  | 125  | 45 (1) мин              | э. з. (51)<br>β <sup>+</sup> (49)                                                    | —<br>2,05                                     | } 0,112; 0,511 (98, ан.)                             |
|                  | 126  | 1,64 (2) мин            | β <sup>+</sup> (82)<br>э. з. (18)                                                    | 3,8<br>—                                      | } 0,386(38); 0,511 (164, ан.);<br>0,925              |
|                  | 127  | 6,25 (10) ч             | э. з. (96,5)<br>β <sup>+</sup> (3,5)                                                 | —<br>1,08                                     | } 0,125 (10); 0,406 (72);<br>0,511 (7, ан.)          |
|                  | 128  | 3,62 (2) мин            | β <sup>+</sup> (51)<br>э. з. (49)                                                    | 2,9<br>—                                      | } 0,441 (27); 0,511 (110, ан.)                       |
|                  | 129  | 32,06 (6) ч             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,375 (48); 0,416 (25); 0,550 (5)                    |
|                  | 130  | 29,9 мин                | β <sup>+</sup><br>э. з.<br>β <sup>-</sup> (1,6)                                      | 1,97<br>—<br>0,442                            | } 0,54; 0,59                                         |
|                  | 131  | 9,69 (1) сут            | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                    |
|                  | 132  | 6,475 (10) сут          | э. з. (97)<br>β <sup>+</sup> (0,6)<br>β <sup>-</sup> (2)                             | —<br>0,40<br>0,8                              | } 0,48* (4); 0,668 (99)                              |
|                  | 133  | Стабилен                | 100                                                                                  | —                                             | —                                                    |
|                  | 134  | 2,062 (5) года          | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,662                                         | 0,57**(23); 0,605 (98);<br>0,796** (99)              |
|                  | 134m | 2,91 (1) ч              | и. п.<br>β <sup>-</sup> (1)                                                          | —<br>0,55<br>0,21                             | } 0,127 (14)                                         |
|                  | 135  | 2,3·10 <sup>6</sup> лет | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                                    |
|                  | 135m | 53 (2) мин              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,781 (100); 0,840 (96)                              |
|                  | 136  | 13,16 (3) сут           | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,657 (7); 0,341                              | 0,16** (36); 0,340 (53);<br>0,818 (100); 1,05 (82)   |
|                  | 137  | 30,0 (2) лет            | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,176 (7); 0,514                              | 0,662 (85)                                           |

| Эле-<br>мент     | А       | Период полураспада | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                |
|------------------|---------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|                  |         |                    |                                                                                      | группы частиц                                 | γ-излучения                                                                    |
| $_{56}\text{Ba}$ | 138     | 32,2 (1) мин       | $\beta^-$                                                                            | 3,40                                          | 0,463 (23); 1,01 (25); 1,426 (73);<br>2,21 (18)                                |
|                  | 138 $m$ | 2,90 (10) мин      | и. п. (75), $\beta^-$ (25)                                                           | —                                             | 0,080; 0,463; 1,436                                                            |
|                  | 139     | 9,27 (5) мин       | $\beta^-$                                                                            | 4,2                                           | 1,28; 1,42                                                                     |
|                  | 140     | 63,7 (3) с         | $\beta^-$                                                                            | 6,2; 5,6                                      | 0,59; 0,88; 1,14; 1,62; 1,85;<br>2,06; 2,32; 2,72; 3,15                        |
|                  | 141     | 24,94 (6) с        | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (0,05)                                                        | —                                             | 0,048; 0,562; 0,589; 1,194                                                     |
|                  | 142     | 1,80 (8) с         | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (0,28)                                                        | —                                             | 0,360; 0,967; 1,326                                                            |
|                  | 143     | 1,78 (3) с         | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (1,7)                                                         | —                                             | 0,196; 0,232; 0,306                                                            |
|                  | 144     | 1,02 (3) с         | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (3)                                                           | —                                             | 0,20; 0,56; 0,64; 0,76                                                         |
|                  | 145     | 0,59 (1) с         | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (12)                                                          | —                                             | 0,11; 0,18; 0,20                                                               |
|                  | 146     | 0,189 (11) с       | $\beta^-$ , $\beta^-n$ (14)                                                          | —                                             | —                                                                              |
|                  | 117     | 1,9 (2) с          | э. з., $p$                                                                           | —                                             | —                                                                              |
|                  | 119     | 5,35 (30) с        | э. з., $p$                                                                           | —                                             | —                                                                              |
|                  | 121     | 29,7 (15) с        | $\beta^+$ , $\beta^+p$ (0,02)                                                        | —                                             | —                                                                              |
|                  | 123     | 2,7 (4) мин        | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,094; 0,116; 0,124                                                            |
|                  | 124     | 11,9 (10) мин      | э. з.                                                                                | —                                             | 0,17; 0,19; 0,27; 1,22                                                         |
|                  | 125     | 3,5 (4) мин        | $\beta^+$                                                                            | 3,4                                           | 0,08; 0,14                                                                     |
|                  | 126     | 100 (2) мин        | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,23/100/; 0,70/33/                                                            |
|                  | 127     | 12,7 (4) мин       | $\beta^+$                                                                            | 2,4                                           | 0,07; 0,12; 0,18                                                               |
|                  | 128     | 2,43 (5) сут       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,134; 0,278                                                                   |
|                  | 129     | 2,23 (11) ч        | э. з. (94)<br>$\beta^+$ (6)                                                          | 1,42                                          | 0,129/26/; 0,182/100/;<br>0,21**/65/; 1,45/42/                                 |
|                  | 130     | Стабилен           | 0,106 (2)                                                                            | —                                             | —                                                                              |
|                  | 131     | 11,8 (2) сут       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,124** (28); 0,216 (19);                                                      |
|                  | 131 $m$ | 14,6 (2) мин       | и. п.                                                                                | —                                             | 0,373 (13); 0,496** (48)                                                       |
|                  | 132     | Стабилен           | 0,101 (2)                                                                            | —                                             | 0,107 (40)                                                                     |
|                  | 133     | 10,5 (2) года      | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                              |
|                  | 133 $m$ | 38,9 (1) ч         | и. п. (> 99),<br>э. з. (0,011)                                                       | —                                             | 0,080** (36); 0,303 (14);<br>0,356 (69)                                        |
|                  | 134     | } Стабилен         | 2,417 (27)                                                                           | —                                             | 0,276 (17)                                                                     |
|                  | 135     |                    | 6,592 (18)                                                                           | —                                             | —                                                                              |
|                  | 135 $m$ | 28,7 (2) ч         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,268 (16)                                                                     |
|                  | 136     | } Стабилен         | 7,854 (39)                                                                           | —                                             | —                                                                              |
|                  | 137     |                    | 11,23 (4)                                                                            | —                                             | —                                                                              |
|                  | 137 $m$ | 2,5513 (7) мин     | и. п.                                                                                | —                                             | 0,662 (89)                                                                     |
|                  | 138     | Стабилен           | 71,70 (7)                                                                            | —                                             | —                                                                              |
|                  | 139     | 84,6 (4) мин       | $\beta^-$                                                                            | 2,3                                           | 0,166 (23); 1,43 (0,4)                                                         |
|                  | 140     | 12,746 (10) сут    | $\beta^-$                                                                            | 1,02                                          | 0,030 (11); 0,537 (34)                                                         |
|                  | 141     | 18,27 (7) мин      | $\beta^-$                                                                            | 3,0                                           | 0,193/100/; 0,28/50/;<br>0,46**/30/; 0,64/20/                                  |
|                  | 142     | 10,6 (2) мин       | $\beta^-$                                                                            | 1,7                                           | 0,080/30/; 0,26/100/; 0,89/40/;<br>1,20/35/                                    |
|                  | 143     | 14,5 (5) с         | $\beta^-$                                                                            | 4,2                                           | 0,211; 0,799; 0,980; 1,011                                                     |
|                  | 144     | 11,4 (5) с         | $\beta^-$                                                                            | 2,9; 2,4                                      | 0,10; 0,16; 0,39; 0,43                                                         |
|                  | 145     | 4,31 (16) с        | $\beta^-$                                                                            | 4,9                                           | 0,09; 0,38; 0,42                                                               |
|                  | 146     | 1,91 (16) с        | $\beta^-$                                                                            | 3,9                                           | 0,12; 0,14; 0,25                                                               |
|                  | 148     | 0,47 (20) с        | $\beta^-$                                                                            | —                                             | 0,13; 0,42; 0,55                                                               |
| $_{57}\text{La}$ | 123     | 17 (3) с           | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,093                                                                          |
|                  | 125     | 76 (6) с           | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,068                                                                          |
|                  | 126     | 1,0 (3) мин        | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,256; 0,511 (ан.)                                                             |
|                  | 127     | 3,8 (5) мин        | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,056                                                                          |
|                  | 128     | 5,0 (3) мин        | $\beta^+$                                                                            | 3,2                                           | 0,279; 0,511 (ан.)                                                             |
|                  | 129     | 11,6 (2) мин       | э. з., $\beta^+$                                                                     | 2,7; 2,4                                      | 0,11; 0,25; 0,28; 0,46                                                         |
|                  | 129 $m$ | 0,56 (5) с         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,172                                                                          |
|                  | 130     | 8,7 (1) мин        | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | 0,356; 0,45; 0,511 (ан.);<br>0,55; 0,72; 0,81; 0,91; 1,01;<br>1,19; 1,45; 1,55 |
|                  | 131     | 59 (2) мин         | э. з. (72)<br>$\beta^+$ (28)                                                         | 1,94                                          | 0,115 (23); 0,364 (20);<br>0,417 (20); 0,511 (56, ан.)                         |

| Эле-<br>мент     | A    | Период полураспада                    | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                           |
|------------------|------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                                       |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                               |
| <sup>58</sup> Ce | 132  | 4,8 (2) ч                             | β <sup>+</sup>                                                                       | 3,7; 3,2                                      | 0,47; 0,511 (ан.); 0,56; 0,66;<br>1,03; 1,22; 1,58; 1,91                  |
|                  | 133  | 3,912 (8) ч                           | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,511 (ан.); 0,62; 0,63                                                 |
|                  | 134  | 6,45 (16) мин                         | β <sup>+</sup>                                                                       | 1,2                                           |                                                                           |
|                  | 135  | 19,5 ч                                | э. з. (38)                                                                           | —                                             | } 0,511 (124, ан.); 0,605 (6)                                             |
|                  | 136  | 9,87 (3) мин                          | β <sup>+</sup> (62)                                                                  | 2,7                                           |                                                                           |
|                  | 137  | 6 (2) · 10 <sup>4</sup> лет           | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,481 (1,9); 0,588 (0,13);<br>0,87** (0,24)                             |
|                  | 138  | 1,28 (12) ×<br>× 10 <sup>11</sup> лет | β <sup>+</sup> (33)                                                                  | 1,9                                           |                                                                           |
|                  | 139  | Стабилен                              | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,511 (66, ан.); 0,818 (2,5)                                            |
|                  | 140  | 40,272 (7) ч                          | 0,09 (1)                                                                             | —                                             |                                                                           |
|                  | 141  | 3,93 (5) ч                            | э. з. (~ 68)                                                                         | —                                             | } 0,81 (30); 1,436 (70)                                                   |
|                  | 142  | 92,5 (5) мин                          | β <sup>-</sup> (~ 32)                                                                | 0,21                                          |                                                                           |
|                  | 143  | 14,23 (14) мин                        | 99,91 (1)                                                                            | —                                             | } 0,329 (20); 0,487 (40); 0,815 (19);<br>0,923 (10); 1,596 (96); 2,53 (3) |
|                  | 144  | 40,9 (4) с                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,175 (6);                                    |                                                                           |
|                  | 145  | 24,8 (20) с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,69 (15); 1,36                               | } 0,65 (48); 0,90 (9); 1,91 (9);<br>2,41 (15); 2,55 (11)                  |
|                  | 146  | 8,8 (4) с                             | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,43                                          |                                                                           |
|                  | 147  | 4,4 (5) с                             | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,51                                          | } 0,62/100/; 0,80/44/; 1,07/26/;<br>1,17/57/;                             |
|                  | 148  | 1,29 (8) с                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,3                                           |                                                                           |
|                  | 125  | 11 (4) с                              | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,4; 4,1                                      | } 1,58/28/; 1,98/35/; 2,56/27/                                            |
|                  | 128  | ~ 6 мин                               | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  | 129  | 3,5 (5) мин                           | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,397; 0,541; 0,845                                                     |
|                  | 130  | 25 (2) мин                            | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  | 131  | 10 (1) мин                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 5,5; 4,5                                      | } 0,12; 0,17; 0,36; 0,45; 1,82                                            |
|                  | 132  | 4,2 (2) ч                             | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  | 133  | 5,40 (5) ч                            | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,259; 0,410; 0,503                                                     |
|                  | 134  | 75,9 (9) ч                            | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  | 135  | 17,6 ч                                | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,159                                                                   |
|                  | 135m | 20 с                                  | β <sup>+</sup> (< 1)                                                                 | 0,81                                          |                                                                           |
|                  | 136  | Стабилен                              | и. п.                                                                                | —                                             | } 0,265/100/; 0,300/56/;                                                  |
|                  | 137  | 9,0 (3) ч                             | 0,19 (1)                                                                             | —                                             |                                                                           |
|                  | 137m | 34,4 (3) ч                            | э. з. (> 99)                                                                         | —                                             | } 0,52**/46/; 0,59**/98/                                                  |
|                  | 138  | Стабилен                              | β <sup>+</sup> (< 0,01)                                                              | —                                             |                                                                           |
|                  | 139  | 137,66 (13) сут                       | э. з. (< 0,01)                                                                       | —                                             | } 0,082; 0,150; 0,296                                                     |
|                  | 140  | 56,4 (5) с                            | и. п. (99,2)                                                                         | —                                             |                                                                           |
|                  | 141  | Стабилен                              | э. з. (0,8)                                                                          | —                                             | } 0,446** (2,3); 0,481** (0,06);<br>0,698 (0,04); 0,92** (0,1)            |
|                  | 142  | 32,50 (1) сут                         | 0,25 (1)                                                                             | —                                             |                                                                           |
|                  | 143  | > 5 · 10 <sup>16</sup> лет            | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,168 (0,4); 0,254 (11);<br>0,762 (0,16); 0,825** (0,5)                 |
|                  | 144  | 33,0 (2) ч                            | и. п.                                                                                | —                                             |                                                                           |
|                  | 145  | 284,9 (2) сут                         | 88,48 (10)                                                                           | —                                             | } 0,165 (80)                                                              |
|                  | 146  | 2,98 (15) мин                         | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,581                                         |                                                                           |
|                  | 147  | 56,4 (12) с                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,39                                          | } 0,746 (93)                                                              |
|                  | 148  | 48 (1) с                              | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,31                                          |                                                                           |
|                  | 151  | 1,02 (6) с                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,0                                           | } 0,057 (11); 0,293 (46); 0,668 (7);<br>0,725 (8)                         |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,7                                           |                                                                           |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,3                                           | } 0,080 (2); 0,134 (11)                                                   |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,7                                           |                                                                           |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,063; 0,285; 0,440; 0,724;<br>1,148                                    |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,110/20/; 0,142/42/; 0,22/50/;                                         |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,27/12/; 0,32/100/                                                     |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,093; 0,269; 0,374; 0,580                                              |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,098, 0,121; 0,292                                                     |
|                  |      |                                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             |                                                                           |



| Эле-<br>мент     | A    | Период полураспада       | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                      |
|------------------|------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                          |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                          |
| $^{63}\text{Pr}$ | 133  | 6,5 (3) мин              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,74; 0,134; 0,361; 0,465                                                            |
|                  | 134  | 17 (2) мин               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,22; 0,30; 0,409; 0,511 (ан.);<br>0,639; 0,96                                       |
|                  | 135  | ~ 22 мин                 | $\beta^+$<br>э. з.                                                                   | 2,5<br>—                                      | } 0,080; 0,22; 0,30; 0,511 (ан.)                                                     |
|                  | 136  | 13,1 (1) мин             | э. з. (~ 67)<br>$\beta^+$ (~ 33)                                                     | —<br>3,5; 3,0                                 | } 0,511 (66, ан.); 0,540; 1,092                                                      |
|                  | 137  | 1,28 (3) ч               | э. з. (73)<br>$\beta^+$ (27)                                                         | —<br>1,7                                      | } 0,511 (54, ан.); 0,837                                                             |
|                  | 138  | 1,45 (5) мин             | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,789                                                                                |
|                  | 138m | 2,1 (1) ч                | э. з. (77)<br>$\beta^+$ (23)                                                         | —<br>1,65                                     | } 0,298 (77); 0,364 (9);<br>0,511 (46, ан.); 0,79 (100);<br>1,04 (100)               |
|                  | 139  | 4,41 (4) ч               | э. з. (89)<br>$\beta^+$ (11)                                                         | —<br>1,09                                     | } 0,511 (18, ан.); 1,35 (0,5);<br>1,61 (0,3)                                         |
|                  | 140  | 3,39 (1) мин             | э. з. (50)<br>$\beta^+$ (50)                                                         | —<br>2,32                                     | } 0,511 (100, ан.); 1,596 (0,3)                                                      |
|                  | 141  | Стабилен                 | 100                                                                                  | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 142  | 19,13 (4) ч              | $\beta^-$ (> 99);<br>э. з. (0,016)                                                   | 2,16                                          | 1,57 (3,7)                                                                           |
|                  | 142m | 14,6 (5) мин             | и. п.                                                                                | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 143  | 13,58 (3) сут            | $\beta^-$                                                                            | 0,933                                         | —                                                                                    |
|                  | 144  | 17,28 (5) мин            | $\beta^-$                                                                            | 2,99                                          | 0,695 (1,5); 1,487 (0,29);<br>2,186 (0,7)                                            |
|                  | 144m | 7,2 (2) мин              | и. п. (99,96),<br>$\beta^-$ (0,04)                                                   | —                                             | 0,059                                                                                |
|                  | 145  | 5,98 (2) ч               | $\beta^-$                                                                            | 1,80                                          | 0,072; 0,68; 0,75; 0,92; 1,05;<br>1,16                                               |
|                  | 146  | 24,07 (13) мин           | $\beta^-$                                                                            | 4,1                                           | 0,455 (77); 0,74 (16); 0,78 (15);<br>1,51 (27)                                       |
|                  | 147  | 13,6 (5) мин             | $\beta^-$                                                                            | 2,7; 2,1                                      | 0,078 (17); 0,127 (9);<br>0,32** (47); 0,56 (39); 0,61 (10);<br>0,65 (24); 1,26 (11) |
|                  | 148  | 2,30 (3) мин             | $\beta^-$                                                                            | 5,0; 4,7                                      | 0,30; 1,36                                                                           |
|                  | 149  | 2,3 (2) мин              | $\beta^-$                                                                            | 2,8                                           | 0,08; 0,155; 0,325; 0,36; 0,745                                                      |
|                  | 150  | 6,19 (16) с              | $\beta^-$                                                                            | —                                             | 0,130; 0,723                                                                         |
|                  | 151  | 4,0 (7) с                | $\beta^-$                                                                            | —                                             | —                                                                                    |
| $^{60}\text{Nd}$ | 134  | 8,5 (15) мин             | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,163                                                                                |
|                  | 135  | 12,1 мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,204; 0,441; 0,502                                                                  |
|                  | 136  | 50,65 (33) мин           | э. з.                                                                                | —                                             | 0,109; 0,149; 0,575                                                                  |
|                  | 137  | 38,5 (15) мин            | $\beta^+$                                                                            | 2,4                                           | 0,109; 0,511 (ан.); 0,55**                                                           |
|                  | 137m | 1,60 (15) с              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,178; 0,286                                                                         |
|                  | 138  | 5,04 (9) ч               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,326                                                                                |
|                  | 139  | 29,7 (5) мин             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,41; 1,07                                                                           |
|                  | 139m | 5,5 (2) ч                | и. п. (12), э. з.<br>$\beta^+$                                                       | —<br>3,1                                      | } 0,114/80; 0,327/50;<br>0,511/1400/;<br>0,73**/210/; 0,82**/70/;<br>0,983/70/       |
|                  | 140  | 3,37 (2) сут             | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 141  | 2,49 (3) ч               | э. з. (90)<br>$\beta^+$ (4)                                                          | —<br>0,79                                     | } 0,145 (0,2); 0,511 (6, ан.);<br>1,14 (2); 1,30 (1)                                 |
|                  | 141m | 62,4 (9) с               | и. п. (99,97),<br>э. з. (0,03)                                                       | —                                             | } 0,756                                                                              |
|                  | 142  | } Стабилен               | 27,13 (10)                                                                           | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 143  |                          | 12,18 (5)                                                                            | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 144  |                          | 23,80 (10)                                                                           | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 144  | 2,4·10 <sup>15</sup> лет | $\alpha$                                                                             | 1,83                                          | —                                                                                    |
|                  | 145  | > 1·10 <sup>17</sup> лет | 8,30 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 146  | Стабилен                 | 17,19 (8)                                                                            | —                                             | —                                                                                    |
|                  | 147  | 10,98 (1) сут            | $\beta^-$                                                                            | 0,9; 0,81                                     | 0,091 (28); 0,319 (3); 0,43** (4);<br>0,533 (13)                                     |

| Элемент          | A    | Период полураспада            | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                    |
|------------------|------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                  |      |                               |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                        |
| $^{61}\text{Pm}$ | 148  | Стабилен                      | 5,76 (3)                                                                | —                                             | —                                                  |
|                  | 149  | 1,73 (1) ч                    | $\beta^-$                                                               | 1,5                                           | 0,114 (18); 0,210 (27);<br>0,27** (26); 0,541 (10) |
|                  | 150  | Стабилен                      | 5,64 (3)                                                                | —                                             | —                                                  |
|                  | 151  | 12,44 (2) мин                 | $\beta^-$                                                               | 2,3; 1,2                                      | 0,118 (40); 0,174** (10);<br>0,256 (11); 1,180 (9) |
|                  | 152  | 11,4 (2) мин                  | $\beta^-$                                                               | 1,2; 0,9                                      | 0,250; 0,279                                       |
|                  | 154  | 40 (10) с                     | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,40; 0,70                                         |
|                  | 136  | 107 (6) с                     | э. з.                                                                   | —                                             | 0,374; 0,603; 0,815; 0,858                         |
|                  | 137  | 2,4 (1) мин                   | э. з.                                                                   | —                                             | 0,108; 0,178; 0,269; 0,581                         |
|                  | 138  | 3,24 (5) мин                  | э. з.                                                                   | —                                             | 0,521; 0,729                                       |
|                  | 139  | 4,15 (5) мин                  | $\beta^+$                                                               | 3,0                                           | 0,368; 0,403; 0,463                                |
|                  | 140  | 9,2 (2) с                     | $\beta^+$                                                               | 5,1                                           | 0,717; 0,774; 1,499                                |
|                  | 141  | 20,90 (5) мин                 | $\beta^+$ (57)                                                          | 2,6                                           | } 0,195 (13); 0,511 (114, ан.)                     |
|                  |      |                               | э. з. (43)                                                              | —                                             |                                                    |
|                  | 142  | 40,5 (5) с                    | $\beta^+$ (~ 95)                                                        | 3,78                                          | } 0,511 (190, ан.); 1,576                          |
|                  |      |                               | э. з. (~ 5)                                                             | —                                             |                                                    |
|                  | 143  | 265 (7) сут                   | э. з.                                                                   | —                                             | 0,742 (47)                                         |
|                  | 144  | 363 (14) сут                  | э. з.                                                                   | —                                             | 0,474 (45); 0,615 (99);<br>0,695 (99)              |
|                  | 145  | 17,7 (4) года                 | э. з. (> 99)<br>$\alpha$ ( $3 \cdot 10^{-7}$ )                          | 2,24                                          | } 0,067 (1,0); 0,072 (2,3)                         |
|                  |      |                               |                                                                         | —                                             |                                                    |
|                  | 146  | 2020 (18) сут                 | э. з. (63)                                                              | —                                             | } 0,453 (65); 0,75* (65)                           |
|                  |      |                               | $\beta^-$ (37)                                                          | 0,78                                          |                                                    |
| $^{62}\text{Sm}$ | 147  | 2,6234 (2) года               | $\beta^-$                                                               | 0,224                                         | —                                                  |
|                  | 148  | 5,37 (1) сут                  | $\beta^-$                                                               | 2,48                                          | 0,551 (27); 0,914 (15); 1,465 (23)                 |
|                  | 148m | 41,3 (1) сут                  | $\beta^-$ (95)                                                          | 1,0; 0,4                                      | } 0,551 (95); 0,630 (87);<br>0,727 (36); 0,137     |
|                  |      |                               | и. п. (5)                                                               | —                                             |                                                    |
|                  | 149  | 53,08 (5) ч                   | $\beta^-$                                                               | 1,07                                          | 0,286 (2); 0,58 (0,1); 0,85 (0,2)                  |
|                  | 150  | 2,68 (2) ч                    | $\beta^-$                                                               | 3,05                                          | 0,334 (71); 0,831 (18);<br>1,165 (23); 1,33 (22)   |
|                  | 151  | 28,40 (4) ч                   | $\beta^-$                                                               | 1,19                                          | 0,17** (18); 0,340 (21)                            |
|                  | 152  | 4,1 (1) мин                   | $\beta^-$                                                               | 3,5                                           | 0,122; 0,841; 0,96*                                |
|                  | 152m | 7,5 (2) мин                   | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,120; 0,245                                       |
|                  | 153  | 5,4 (2) мин                   | $\beta^-$                                                               | 1,65                                          | 0,12; 0,18                                         |
|                  | 154  | 2,7 (1) мин                   | $\beta^-$                                                               | 2,5                                           | 0,08; 0,18; 1,44                                   |
|                  | 134  | 12 (3) с                      | —                                                                       | —                                             | —                                                  |
|                  | 137  | 44 (8) с                      | —                                                                       | —                                             | —                                                  |
|                  | 138  | 3,0 (3) мин                   | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,05; 0,075                                        |
|                  | 139  | 2,57 (1) мин                  | $\beta^+$                                                               | 3,6                                           | 0,274; 0,306; 0,597                                |
|                  | 139m | 9,5 (1) с                     | и. п. (93,7),<br>э. з. (6,3)                                            | —                                             | 0,155; 0,189                                       |
|                  | 140  | 14,82 (10) мин                | $\beta^+$                                                               | 1,9                                           | 0,23; 0,14                                         |
|                  | 141  | 10,2 (2) мин                  | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | 0,20; 0,43; 0,78                                   |
|                  | 141m | 22,6 (2) мин                  | э. з. (99,69),<br>и. п. (0,31)                                          | —                                             | —                                                  |
|                  | 142  | 72,49 (5) мин                 | э. з. (~ 50)<br>$\beta^+$ (~ 50)                                        | 1,03                                          | } 0,15—0,35**; 0,511 (100, ан.)                    |
|                  |      |                               |                                                                         | —                                             |                                                    |
|                  | 143  | 8,83 (2) мин                  | э. з. (52)                                                              | —                                             | } 0,511 (100, ан.); 1,06                           |
|                  |      |                               | $\beta^+$ (48)                                                          | 2,5                                           |                                                    |
|                  | 143m | 66 (2) с                      | э. з. (0,20),<br>и. п. (99,80)                                          | —                                             | 0,754                                              |
|                  | 144  | Стабилен                      | 3,1 (1)                                                                 | —                                             | —                                                  |
|                  | 145  | 340 (3) сут                   | э. з.                                                                   | —                                             | 0,061; 0,485                                       |
|                  | 146  | 1,03 (3) $\times 10^8$ лет    | $< 2 \cdot 10^{-7}$ , $\alpha$                                          | 2,47                                          | —                                                  |
|                  | 147  | 1,06 (2) $\times 10^{11}$ лет | 15,0 (2)                                                                | —                                             | —                                                  |
|                  |      |                               | $\alpha$                                                                | 2,23                                          | —                                                  |
|                  | 148  | 8 (2) $\cdot 10^{15}$ лет     | 11,3 (1)                                                                | —                                             | } —                                                |
|                  |      |                               | $\alpha$                                                                | 1,96                                          |                                                    |

| Эле-<br>мент     | A                 | Период полураспада | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                    |
|------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                  |                   |                    |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                        |
| <sup>63</sup> Eu | 149               | $> 1,10^{16}$ лет  | 13,8 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                  |
|                  | 150               | Стабилен           | 7,4 (1)                                                                              | —                                             | —                                                                  |
|                  | 151               | 90 (6) лет         | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,076                                         | 0,022 (4)                                                          |
|                  | 152               | Стабилен           | 26,7 (2)                                                                             | —                                             | —                                                                  |
|                  | 153               | 46,7 (1)           | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,80                                          | 0,070 (5,4); 0,103 (28)                                            |
|                  | 154               | Стабилен           | 22,7 (2)                                                                             | —                                             | —                                                                  |
|                  | 155               | 22,1 (2) мин       | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,53                                          | 0,104 (73); 0,246 (4)                                              |
|                  | 156               | 9,4 (2) ч          | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,72                                          | 0,088 (30); 0,166 (10); 0,204 (20)                                 |
|                  | 157               | 8,0 (5) мин        | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,4                                           | 0,20; 0,39                                                         |
|                  | 158               | 5,54 (9) мин       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,19; 0,32; 0,36                                                   |
|                  | 139               | 22 (3) с           | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | —                                                                  |
|                  | 141               | 40,0 (7) с         | β <sup>+</sup>                                                                       | 5,0                                           | 0,39*; 0,59                                                        |
|                  | 141m              | 3,3 (3) с          | э. з. (67), и. п. (33)                                                               | —                                             | 0,096                                                              |
|                  | 142               | 2,4 (2) с          | β <sup>+</sup>                                                                       | 7,0                                           | 0,77                                                               |
|                  | 142m              | 1,22 (2) мин       | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | 4,8                                           | 0,77; 1,03                                                         |
|                  | 143               | 2,63 (5) мин       | β <sup>+</sup>                                                                       | 4,1                                           | 0,511 (ан.); 1,11; 1,54; 1,80;<br>1,91                             |
|                  | 144               | 10,2 (1) с         | β <sup>+</sup>                                                                       | 5,2                                           | 0,511 (ан.); 0,818; 1,660                                          |
|                  | 145               | 5,93 (4) сут       | э. з. (99)<br>β <sup>+</sup> (1)                                                     | —<br>1,7 [2]                                  | } 0,656/30/; 0,894/100/; 1,66/16/                                  |
|                  | 146               | 4,61 (24) сут      | э. з. (96,5)<br>β <sup>+</sup> (3,5)                                                 | —<br>2,11 (0,14); 1,47 (3,3)                  |                                                                    |
|                  | 147               | 24 (1) сут         | э. з. (99,5)<br>β <sup>+</sup> (0,5)                                                 | —<br>—                                        | } 0,122 (20); 0,198 (24); 0,680 (11);<br>0,957 (9); 1,079 (9)      |
|                  | 148               | 54,5 сут           | α (0,002)<br>э. з. (> 99)<br>β <sup>+</sup> (0,13)<br>α (9·10 <sup>-7</sup> )        | —<br>—<br>0,92<br>2,63                        |                                                                    |
|                  | 149               | 93,1 (4) сут       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,277/10/; 0,328/10/                                               |
|                  | 150               | 12,62 (10) ч       | β <sup>-</sup> (90)<br>э. з. (9)<br>β <sup>+</sup> (0,4)                             | 1,01<br>—<br>1,24                             | } 0,334 (4); 0,406 (3);<br>0,511 (0,8; ан.)                        |
|                  | 151               | Стабилен           | 47,8 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                  |
|                  | 152               | 13,33 (4) года     | э. з. (73)<br>β <sup>-</sup> (27)<br>β <sup>+</sup> (0,021)                          | —<br>1,48<br>0,71                             | } 0,122 (37); 0,344 (77);<br>0,965 (15); 1,408 (22)                |
|                  | 152m <sub>1</sub> | 9,32 (1) ч         | β <sup>-</sup> (76)<br>э. з. (24)<br>β <sup>+</sup> (0,011)                          | 1,88<br>—<br>0,89                             |                                                                    |
|                  | 152m <sub>2</sub> | 96 (1) мин         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,090; 0,148                                                       |
|                  | 153               | Стабилен           | 52,2 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                  |
|                  | 154               | 8,8 (1) года       | β <sup>-</sup> (99,98),<br>э. з. (0,02)                                              | 1,85 (10); 0,87                               | } 0,123 (38); 0,724 (21);<br>0,876 (12); 1,00* (31);<br>1,278 (37) |
|                  | 154m              | 46,0 (3) мин       | и. п.                                                                                | —                                             | 0,068; 0,101                                                       |
|                  | 155               | 4,96 (1) года      | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,25                                          | 0,087 (32); 0,105 (20)                                             |
|                  | 156               | 15,19 (6) сут      | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,45                                          | 0,089 (8); 0,812 (9); 1,07** (11);<br>1,15** (14); 1,24** (16)     |
|                  | 157               | 15,15 (4) ч        | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,3                                           | 0,064 (27); 0,37* (14); 0,413 (27)                                 |
|                  | 158               | 45,9 (2) мин       | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,4; 2,5                                      | 0,080/100/; 0,52**/25/;<br>0,95**/95/; 1,19/16/                    |
|                  | 159               | 18,7 (4) мин       | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,6                                           | 0,07 (42); 0,09 (18); 0,15 (14);<br>0,67 (21)                      |
|                  | 160               | 80 (10) с          | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,9                                           | 0,075; 0,17; 0,41; 0,52; 0,82                                      |
| <sup>64</sup> Gd | 142               | 1,5 (3) мин        | э. з.                                                                                | —                                             | 0,179                                                              |
|                  | 143               | 39 (2) с           | э. з.                                                                                | —                                             | 0,20; 0,26; 0,46                                                   |
|                  | 144               | 4,5 (1) мин        | β <sup>+</sup>                                                                       | 3,3                                           | 0,333; 0,347                                                       |

| Элемент          | A    | Период полураспада            | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                    |
|------------------|------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                               |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                                |
| <sup>65</sup> Tb | 145  | 23,9 (1) мин                  | $\beta^+$                                                               | —                                             | { 0,511 (ан.); 0,80/9/; 1,03/10/;<br>1,75/100/;<br>0,749           |
|                  | 145m | 85 (3) с                      | и. п. (95,3),<br>$\beta^+$ (4,7)                                        | 2,3                                           |                                                                    |
|                  | 146  | 48,3 (1) сут                  | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,078/30/; 0,115**/100/;<br>0,155/45/                              |
|                  | 147  | 38,1 (1) ч                    | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,229/150/; 0,39**/85/;<br>0,64**/70/; 0,77**/60/;<br>0,932/60/    |
|                  | 148  | 93 (6) года                   | $\alpha$                                                                | 3,183 (100)                                   | —                                                                  |
|                  | 149  | 9,4 (3) сут                   | $\beta^+$ ( $> 99$ )<br>$\alpha$ ( $\sim 0,001$ )                       | —<br>3,01                                     | { 0,150 (48); 0,299 (26);<br>0,347 (25); 0,750 (11)                |
|                  | 150  | 1,79 (8) $\times 10^6$ лет    | $\alpha$                                                                | 2,72 (100)                                    |                                                                    |
|                  | 151  | 120 (20) сут                  | $\beta^+$<br>$\alpha$ ( $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ )                        | —<br>2,60                                     | { 0,0216 (3); 0,154 (7); 0,175 (3);<br>0,244 (7)                   |
|                  | 152  | 1,08 (8) $\times 10^{14}$ лет | 0,20 (1)                                                                | —                                             |                                                                    |
|                  | 153  | 241,6 (2) сут                 | $\alpha$<br>$\beta^+$                                                   | 2,14<br>—                                     | —<br>0,070 (2,4); 0,099** (55)                                     |
|                  | 154  | } Стабилен                    | 2,18 (3)                                                                | —                                             | —                                                                  |
|                  | 155  |                               | 14,80 (5)                                                               | —                                             | —                                                                  |
|                  | 156  |                               | 20,47 (4)                                                               | —                                             | —                                                                  |
|                  | 157  |                               | 15,65 (3)                                                               | —                                             | —                                                                  |
|                  | 158  |                               | 24,84 (12)                                                              | —                                             | —                                                                  |
|                  | 159  | 18,56 (8) ч                   | $\beta^-$                                                               | 0,95                                          | 0,058 (3); 0,363 (9)                                               |
|                  | 160  | Стабилен                      | 21,86 (4)                                                               | —                                             | —                                                                  |
|                  | 161  | 3,7 (1) мин                   | $\beta^-$                                                               | 1,7; 1,6                                      | 0,102 (11); 0,315 (25); 0,361 (66)                                 |
|                  | 162  | 9 (1) мин                     | $\beta^-$                                                               | 1,0                                           | 0,40; 0,44                                                         |
|                  | 146  | 23 (2) с                      | $\beta^+$                                                               | —                                             | 1,08; 1,42; 1,58                                                   |
|                  | 147  | 1,65 (10) ч                   | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,305; 0,511 (ан.); 0,694; 1,152                                   |
|                  | 148  | 60 (1) мин                    | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,511 (ан.); 0,78; 1,12                                            |
|                  | 149  | 4,15 (5) ч                    | $\beta^+$ (83)<br>$\alpha$ ( $\sim 17$ )                                | —<br>3,95                                     | { 0,16; 0,35<br>0,796                                              |
|                  | 149m | 4,3 (1) мин                   | $\beta^+$ ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,020)                                | —<br>3,99                                     |                                                                    |
|                  | 150  | 3,27 (10) ч                   | $\beta^+$ ( $> 99$ )<br>$\beta^+$<br>$\alpha$ ( $\leq 0,05$ )           | —<br>3,6<br>3,49                              | { 0,511/100, ан./; 0,637/100/;<br>0,93/35/                         |
|                  | 151  | 17,6 (1) ч                    | $\beta^+$ ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,009)                                | —<br>3,41                                     |                                                                    |
|                  | 152  | 17,5 (1) ч                    | $\beta^+$ (80)<br>$\beta^+$ ( $\sim 20$ )                               | —<br>2,82                                     | { 0,344/100/; 0,586/14/;<br>0,779/14/                              |
|                  | 152m | 4,3 (2) мин                   | и. п. (78), $\beta^+$ (22)                                              | —                                             |                                                                    |
|                  | 153  | 2,34 (1) сут                  | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,344; 0,411<br>0,083** (11), 0,11** (12);<br>0,212 (30)           |
|                  | 154  | 21,4 (5) ч                    | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,123; 0,248; 0,347, 0,53**;<br>0,65**                             |
|                  | 155  | 5,32 (6) сут                  | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,087 (37); 0,105 (25); 0,180 (8)                                  |
|                  | 156  | 5,34 (9) сут                  | $\beta^+$                                                               | —                                             | 0,089 (17); 0,199 (40);<br>0,535 (70); 1,22 (29); 1,42 (15)        |
|                  | 156m | 5,0 (1) ч                     | и. п.                                                                   | —                                             | 0,688                                                              |
|                  | 157  | 150 (30) лет                  | $\beta^+$                                                               | —                                             | —                                                                  |
|                  | 158  | $\sim 150$ лет                | $\beta^+$ (82), $\beta^-$ (18)                                          | —                                             | 0,08; 0,94; 0,96                                                   |
|                  | 158m | 10,5 (2) с                    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,110 (0,5)                                                        |
|                  | 159  | Стабилен                      | 100                                                                     | —                                             | —                                                                  |
|                  | 160  | 72,3 (2) сут                  | $\beta^-$                                                               | 1,74 (0,4); 0,86                              | 0,087 (12); 0,299 (30);<br>0,879 (31); 0,966** (31);<br>1,178 (15) |
|                  | 161  | 6,91 (2) сут                  | $\beta^-$                                                               | 0,59 (10); 0,52                               | 0,026 (21); 0,049 (19); 0,075 (10)                                 |
|                  | 162  | 7,7 (2) мин                   | $\beta^-$                                                               | 2,4; 1,4                                      | 0,180/26/; 0,258/100/;<br>0,81/44/; 0,89/54/                       |

| Эле-<br>мент     | A    | Период полураспада         | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                           |
|------------------|------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                            |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                               |
| <sup>66</sup> Dy | 163  | 19,5 (3) мин               | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,3; 0,8                                      | 0,025; 0,235; 0,330; 0,510                                                |
|                  | 164  | 3,0 (1) мин                | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,9; 1,7                                      | 0,17; 0,69; 0,75                                                          |
|                  | 148  | 3,1 (1) мин                | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,620                                                                     |
|                  | 149  | 4,6 (4) мин                | β <sup>+</sup>                                                                       | —                                             | 0,10; 0,79; 1,78; 1,81                                                    |
|                  | 150  | 7,17 (2) мин               | э. з., β <sup>+</sup><br>α (31)                                                      | —<br>4,23                                     | } 0,39; 0,511 (ан.)                                                       |
|                  | 151  | 16,9 (5) мин               | β <sup>+</sup> + э. з. (94)<br>α (6)                                                 | —<br>4,06                                     | } 0,145; 0,511 (ан.); 0,546                                               |
|                  | 152  | 2,38 (2) ч                 | э. з.<br>α (0,09)                                                                    | —<br>3,65                                     | } 0,257                                                                   |
|                  | 153  | 6,4 (1) ч                  | э. з.<br>α (0,010)                                                                   | —<br>3,48                                     | } 0,08**; 0,25**                                                          |
|                  | 154  | ~ 1·10 <sup>7</sup> лет    | α                                                                                    | 2,85                                          | —                                                                         |
|                  | 155  | 10,0 (3) ч                 | э. з.<br>β <sup>+</sup> (2)                                                          | —<br>1,08 (0,14); 0,85 (2)                    | } 0,227 (68); 0,52** (8); 1,000 (6);<br>1,16** (6)                        |
|                  | 156  | > 1,0×10 <sup>18</sup> лет | 0,06 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                         |
|                  | 157  | 8,1 (1) ч                  | э. з.                                                                                | —                                             | 0,326 (91)                                                                |
|                  | 158  | Стабилен                   | 0,10 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                         |
|                  | 159  | 144,4 (2) сут              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,058 (4); 0,348                                                          |
|                  | 160  | } Стабилен                 | 2,34 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                         |
|                  | 161  |                            | 18,9 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                         |
|                  | 162  |                            | 25,5 (2)                                                                             | —                                             | —                                                                         |
|                  | 163  |                            | 24,9 (2)                                                                             | —                                             | —                                                                         |
|                  | 164  |                            | 28,2 (2)                                                                             | —                                             | —                                                                         |
|                  | 165  | 2,334 (6) ч                | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,29                                          | 0,095 (4); 0,361 (1,1)                                                    |
|                  | 165m | 1,26 (1) мин               | и. п. (97,8)<br>β <sup>-</sup> (2,2)                                                 | —<br>1,04 (0,4); 0,89                         | } 0,108 (3); 0,514 (1,8)                                                  |
|                  | 166  | 81,6 (1) ч                 | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,48 (5); 0,40                                | 0,082 (12); 0,372 (0,5);<br>0,426 (0,5)                                   |
|                  | 167  | 6,2 мин                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,0; 1,8                                      | 0,25; 0,26; 0,31; 0,57                                                    |
| <sup>67</sup> Ho | 150  | 40 (5) с                   | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                         |
|                  | 151  | 47 (2) с                   | э. з. (90)<br>α (10)                                                                 | —<br>4,51                                     | —                                                                         |
|                  | 152  | 52,3 (5) с                 | э. з. (94)<br>α (6)                                                                  | —<br>4,45                                     | } 0,614; 0,647                                                            |
|                  | 153  | 9,3 (5) мин                | э. з.<br>α (0,1)                                                                     | —<br>3,92                                     | } 0,109; 0,162; 0,366                                                     |
|                  | 154  | 11,8 (5) мин               | э. з. (> 99)<br>α (0,017)                                                            | —<br>3,93                                     | } 0,335; 0,511 (ан.); 0,873                                               |
|                  | 155  | 48 (1) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,092; 0,138; 0,511 (ан.)                                                 |
|                  | 156  | 55,6 (6) мин               | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,9/1/; 1,8/18/                               | 0,138/100/; 0,266/99/;<br>0,367/23/; 0,511 (ан.)                          |
|                  | 157  | 12,6 (6) мин               | β <sup>+</sup>                                                                       | 1,5; 1,2                                      | 0,087; 0,152; 0,190; 0,227;<br>0,341; 0,511 (ан.)                         |
|                  | 158  | 11,3 (4) мин               | β <sup>+</sup>                                                                       | 2,9; 1,3                                      | 0,099; 0,218; 0,329; 0,412;<br>0,52; 0,647; 0,949                         |
|                  | 158m | 27 (2) мин                 | и. п. (65)<br>э. з. (35)                                                             | —<br>—                                        | } 0,099; 0,218; 0,356; 0,412;                                             |
|                  | 159  | 33 (1) мин                 | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,057; 0,080; 0,13; 0,253;<br>0,309                                       |
|                  | 159m | 8,30 (8) с                 | и. п.                                                                                | —                                             | 0,206                                                                     |
|                  | 160  | 25,6 (3) мин               | э. з. (> 90)<br>β <sup>+</sup> (~ 0,4)                                               | —<br>—                                        | } 0,73; 0,96*                                                             |
|                  | 160m | 5,02 (5) ч                 | и. п. (65)                                                                           | —                                             | 0,060; 0,197 (20); 0,646 (20);<br>0,729 (50); 0,880 (26);<br>0,965** (37) |
|                  | 161  | 2,48 (5) ч                 | э. з. + β <sup>+</sup> (35)                                                          | 1,9                                           | 0,026 (23); 0,078 (15)                                                    |
|                  | 161m | 6,7 с                      | и. п.                                                                                | —                                             | 0,211 (53)                                                                |

| Эле-<br>мент     | A    | Период полураспада                   | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                        |
|------------------|------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                                      |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                            |
| <sup>68</sup> Er | 162  | 15 (1) мин                           | э. з. (95)<br>β <sup>+</sup> (5)                                                     | —<br>1,10                                     | } 0,081 (8); 0,511 (9, ан.); 1,319                                                     |
|                  | 162m | 68 (1) мин                           | и. п. (61)<br>э. з. (39)                                                             | —<br>—                                        |                                                                                        |
|                  | 163  | 33 (23) года                         | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,185 (26); 0,940 (13); 1,224(24)                                                    |
|                  | 163m | 1,09 (3) с                           | и. п.                                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 164  | 29 (1) мин                           | э. з. (58)<br>β <sup>-</sup> (42)                                                    | —<br>0,99                                     | } 0,073; 0,091                                                                         |
|                  | 164m | 37,5 (10) мин                        | и. п.                                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 165  | Стабилен                             | 100                                                                                  | —                                             | } 0,037; 0,057                                                                         |
|                  | 166  | 26,80 ч                              | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,84                                          |                                                                                        |
|                  | 166m | 1,20 (18) ×<br>× 10 <sup>3</sup> лет | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,07                                          | } 0,081 (5,4); 1,380 (0,9)<br>0,184 (90); 0,280 (30);<br>0,711 (58); 0,810 (60)        |
|                  | 167  | 3,1 (1) ч                            | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,96; 0,3                                     |                                                                                        |
|                  | 168  | 3,0 (1) мин                          | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,2                                           | } 0,06—0,53<br>0,741; 0,821                                                            |
|                  | 169  | 4,7 (1) мин                          | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,95; 1,2                                     |                                                                                        |
|                  | 170  | 42 (3) с                             | β <sup>-</sup>                                                                       | 4,0                                           | } 0,15; 0,68; 0,84; 0,92<br>0,079; 0,812; 1,894; 1,973                                 |
|                  | 151  | 23 (2) с                             | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 152  | 10,1 (2) с                           | α (~ 90)<br>э. з. (~ 10)                                                             | 4,80<br>—                                     | } —<br>—                                                                               |
|                  | 153  | 36 (1) с                             | э. з. (~ 62)<br>α (~ 38)                                                             | —<br>4,67                                     |                                                                                        |
|                  | 154  | 3,75 (12) мин                        | α (0,5)<br>э. з. (> 99)                                                              | 4,15<br>—                                     | } —<br>—                                                                               |
|                  | 155  | 5,3 (3) мин                          | э. з. (> 99)<br>α (~ 0,02)                                                           | —<br>4,012                                    |                                                                                        |
|                  | 156  | 20 мин                               | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,110; 0,242; 0,234<br>0,030; 0,035                                                  |
|                  | 157  | 25 (3) мин                           | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 158  | 2,25 (7) ч                           | э. з.<br>β <sup>+</sup>                                                              | —<br>0,8                                      | } 0,117; 0,386; 0,511 (ан.); 1,32<br>0,072; 0,250; 0,315; 0,387;<br>0,511 (ан.); 0,875 |
|                  | 159  | 36 (1) мин                           | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 160  | 28,6 ч                               | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,37—2,60<br>—                                                                       |
|                  | 161  | 3,24 (4) ч                           | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 162  | Стабилен                             | 0,14 (1)                                                                             | —                                             | } 0,211 (9); 0,592 (8); 0,826 (63)<br>—                                                |
|                  | 163  | 75,0 (4) мин                         | э. з. (> 99)<br>β <sup>+</sup> (0,004)                                               | —<br>0,19                                     |                                                                                        |
|                  | 164  | Стабилен                             | 1,61 (1)                                                                             | —                                             | } 0,43 (0,06); 1,10 (0,04)<br>—                                                        |
|                  | 165  | 10,36 (4) ч                          | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 166  | } Стабилен                           | 33,6 (2)                                                                             | —                                             | } —<br>—                                                                               |
|                  | 167  |                                      | 22,95 (13)                                                                           | —                                             |                                                                                        |
|                  | 167m | 2,28 (3) с                           | и. п.                                                                                | —                                             | } 0,208 (43)<br>—                                                                      |
|                  | 168  | Стабилен                             | 26,8 (2)                                                                             | —                                             |                                                                                        |
|                  | 169  | 9,40 (2) сут                         | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,34                                          | } 0,008 (0,3)<br>—                                                                     |
|                  | 170  | Стабилен                             | 14,9 (1)                                                                             | —                                             |                                                                                        |
|                  | 171  | 7,52 (3) ч                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,49 (2,3); 1,06                              | } 0,112 (25); 0,296 (28); 0,308 (63)<br>0,407 (40); 0,610 (40)                         |
|                  | 172  | 49,3 (5) ч                           | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,89 (< 10); 0,37                             |                                                                                        |
|                  | 173  | 1,4 (1) мин                          | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | } 0,193; 0,199; 0,895<br>—                                                             |
| <sup>68</sup> Tm | 153  | 1,59 (8) с                           | α                                                                                    | 5,10                                          |                                                                                        |
|                  | 154  | 3,0 (2) с                            | α                                                                                    | 5,04                                          | } —<br>—                                                                               |
|                  | 155  | 39 (3) с                             | α                                                                                    | —                                             |                                                                                        |
|                  | 156  | 19 (3) с                             | α                                                                                    | 4,46                                          | } —<br>—                                                                               |
|                  | 157  | 3,5 (3) мин                          | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 158  | 4,02 (10) мин                        | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,110; 0,348; 0,386; 0,455<br>0,192; 0,335; 0,628; 1,150                             |
|                  | 159  | 9,0 (4) мин                          | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | 2,1                                           |                                                                                        |
|                  | 160  | 9,2 (4) мин                          | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | } 0,038; 0,085; 0,220; 0,271;<br>0,289                                                 |
|                  | 161  | 38 (4) мин                           | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 162  | 21,7 (2) мин                         | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | 3,7; 2,1                                      | } 0,126; 0,264; 0,729<br>0,084; 0,106; 0,112; 0,172;<br>1,648                          |
|                  | 162m | 24,3 (17) с                          | и. п. (90), э.з. (10)                                                                | —                                             |                                                                                        |
|                  | 163  | 1,81 (6) ч                           | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | } 0,102/20; 0,236/10; 0,900<br>0,192; 0,812<br>0,104/8; 0,240**/5; 1,4                 |

| Эле-<br>мент     | A         | Период полураспада | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                                                                                            |
|------------------|-----------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |           |                    |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                                                                                                |
| $^{90}\text{Yb}$ | 164       | 2,0 (1) мин        | э. з. (50)<br>$\beta^+$ (50)                                                         | —<br>2,94                                     | } 0,091 (4); 0,511 (100, ан.);<br>1,155<br>0,208; 0,315                                                                                                    |
|                  | 164 $m$   | 5,1 (1) мин        | и. п. (80), э. з. (20)                                                               | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 165       | 30,06 (3) ч        | э. з.<br>$\beta^+$ (0,007)                                                           | —<br>0,30                                     | } 0,243 (50); 0,297** (35);<br>0,807 (15)                                                                                                                  |
|                  | 166       | 7,70 (3) ч         | э. з. (98,2)<br>$\beta^+$ (~ 2)                                                      | —<br>1,94                                     |                                                                                                                                                            |
|                  | 167       | 9,24 (2) сут       | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,057 (4); 0,208 (43); 0,532 (2)<br>0,19** (77); 0,448 (27);<br>0,73** (40); 0,82** (88)                                                                 |
|                  | 168       | 93,1 (1) сут       | э. з. (~ 98),<br>$\beta^-$ (~ 2)                                                     | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 169       | Стабилен           | 100                                                                                  | —                                             | } 0,084 (3,3)                                                                                                                                              |
|                  | 170       | 128,6 (3) сут      | $\beta^-$ (> 99)<br>э. з. (0,144)                                                    | 0,97<br>—                                     |                                                                                                                                                            |
|                  | 171       | 1,96 (1) года      | $\beta^-$                                                                            | 0,097                                         | } 0,067<br>0,079 (5); 0,181 (2,2); 1,09 (7);<br>1,39 (7); 1,46 (7); 1,53 (6)<br>0,399 (89); 0,465 (8)                                                      |
|                  | 172       | 63,6 (2) ч         | $\beta^-$                                                                            | 1,88                                          |                                                                                                                                                            |
|                  | 173       | 8,24 (8) ч         | $\beta^-$                                                                            | 1,3 (2); 0,89                                 | } 0,176 (67); 0,273 (85); 0,366 (93);<br>0,50 (15); 0,99 (89)<br>0,51; 0,94<br>0,19; 0,38; 1,07                                                            |
|                  | 174       | 5,4 (1) мин        | $\beta^-$                                                                            | 1,2                                           |                                                                                                                                                            |
|                  | 175       | 15,2 (5) мин       | $\beta^-$                                                                            | 2,0                                           | } 0,080; 0,069; 1,09<br>0,082 (17)<br>0,113** (90); 0,176 (15)                                                                                             |
|                  | 176       | 1,9 (1) мин        | $\beta^-$                                                                            | 2,8                                           |                                                                                                                                                            |
|                  | 154       | 0,42 (2) с         | $\alpha$                                                                             | 5,33                                          | } 0,164; 0,231<br>0,074<br>0,17; 0,18; 0,33; 0,39<br>0,174; 0,216<br>0,078; 0,600; 0,631<br>0,119; 0,163<br>0,064; 0,123; 0,860                            |
|                  | 155       | 1,65 (15) с        | $\alpha$                                                                             | 5,21                                          |                                                                                                                                                            |
|                  | 156       | 24 (1) с           | $\alpha$                                                                             | 4,69                                          | } 0,080; 0,069; 1,09<br>0,082 (17)<br>0,113** (90); 0,176 (15)                                                                                             |
|                  | 157       | 38,6 (10) с        | $\alpha$                                                                             | 4,51                                          |                                                                                                                                                            |
|                  | 158       | 1,38 (14) мин      | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,114 (1,9); 0,283 (3,7);<br>0,396 (6,0)<br>0,19; 0,29; 0,39<br>0,122 (3); 0,151 (16); 1,080 (5);<br>1,241 (3)<br>0,104 (65); 0,228 (13)<br>0,348; 0,391 |
|                  | 159       | 1,75 (20) мин      | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 160       | 4,8 мин            | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 161       | 4,2 (2) мин        | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 162       | 18,9 (2) мин       | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 163       | 11,05 (25) мин     | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 164       | 75,8 (17) мин      | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 165       | 9,9 (3) мин        | э. з.<br>$\beta^+$                                                                   | —<br>1,6                                      |                                                                                                                                                            |
|                  | 166       | 56,7 (1) ч         | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 167       | 17,5 (2) мин       | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 168       | Стабилен           | 0,13 (1)                                                                             | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 169       | 32,022 (8) сут     | э. з.                                                                                | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 169 $m$   | 46 (2) с           | и. п.                                                                                | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 170       | } Стабилен         | 3,05 (5)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 171       |                    | 14,3 (2)                                                                             | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 172       |                    | 21,9 (3)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 173       |                    | 16,12 (18)                                                                           | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 174       |                    | 31,8 (4)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 175       |                    | $\beta^-$                                                                            | 0,466                                         | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 176       |                    | 12,7 (1)                                                                             | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 176 $m$   | 11,4 (5) с         | и. п.                                                                                | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 177       | 1,9 (1) ч          | $\beta^-$                                                                            | 1,40                                          |                                                                                                                                                            |
|                  | 177 $m$   | 6,41 (2) с         | и. п.                                                                                | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 178       | 74 (3) мин         | $\beta^-$                                                                            | 0,6                                           |                                                                                                                                                            |
| $^{71}\text{Lu}$ | 155       | 0,07 (2) с         | $\alpha$                                                                             | 5,63                                          | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 156       | 0,23 (3) с         | $\alpha$                                                                             | 5,54                                          |                                                                                                                                                            |
|                  | 157       | 5,5 (3) с          | $\alpha$                                                                             | 4,996                                         | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 164       | 3,1 мин            | $\beta^+$                                                                            | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 165       | 12 (1) мин         | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | } 0,034; 0,102; 0,228; 0,285                                                                                                                               |
|                  | 166       | 2,65 (10) мин      | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             |                                                                                                                                                            |
|                  | 166 $m_1$ | 1,41 (10) мин      | э. з. (58),<br>и. п. (42)                                                            | —                                             |                                                                                                                                                            |

| Элемент            | A         | Период полураспада                    | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                    |
|--------------------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                    |           |                                       |                                                                         | группы частиц                                 | γ-излучения                                                        |
| ${}^{72}\text{Hf}$ | 166 $m_2$ | 2,12 (10) мин                         | э. з. (> 80)                                                            | —                                             | 1,26; 1,43; 2,10                                                   |
|                    | 167       | 51,5 (10) мин                         | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,030; 0,278; 0,372; 0,402;<br>0,511 (ан.); 1,267                |
|                    | 168       | 5,3 (2) мин                           | $\beta^+$ (~ 1)                                                         | 1,5                                           |                                                                    |
|                    | 168 $m$   | 6,7 (4) мин                           | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,087 (7); 0,90 (10); 0,99 (13);<br>0,198; 0,89*; 0,979          |
|                    | 169       | 34,06 (5) ч                           | $\beta^+$ (~ 12)                                                        | 1,2                                           |                                                                    |
|                    | 169 $m$   | 160 (10) с                            | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | } 0,063; 0,111; 0,191; 0,577<br>0,029                              |
|                    | 170       | 2,00 (3) сут                          | э. з.                                                                   | —                                             |                                                                    |
|                    | 170 $m$   | 0,7 с                                 | $\beta^+$                                                               | 1,2                                           | } 0,084 (13); 0,98; 1,28; 2,04<br>—                                |
|                    | 171       | 8,22 (3) сут                          | н. п.                                                                   | 2,4                                           |                                                                    |
|                    | 171 $m$   | 79 (2) с                              | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,019 (20); 0,668 (14); 0,741 (68)<br>0,071 (0,2)                |
|                    | 172       | 6,70 (3) сут                          | $\beta^+$ (~ 0,01)                                                      | —                                             |                                                                    |
|                    | 172 $m$   | 3,7 мин                               | н. п.                                                                   | —                                             | } 0,182 (26); 0,81 (21);<br>0,90** (45); 1,09 (60)                 |
|                    | 173       | 1,37 (1) года                         | э. з.                                                                   | —                                             |                                                                    |
|                    | 174       | 3,31 (5) года                         | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | } 0,079 (14); 0,101 (7); 0,272 (18)<br>0,076 (6); 1,24 (9)         |
|                    | 174 $m$   | 142 (2) сут                           | н. п. (99,3),<br>э. з. (0,7)                                            | —                                             |                                                                    |
|                    | 175       | Стабилен                              | 97,41 (2)                                                               | —                                             | } 0,067; 0,176; 0,273; 0,994<br>—                                  |
|                    | 176       | 3,60 (16) ×<br>× 10 <sup>10</sup> лет | $\beta^-$                                                               | 0,6                                           |                                                                    |
|                    | 176 $m$   | 3,68 (1) ч                            | 2,59 (2)                                                                | —                                             | } 0,088; 0,126<br>0,113 (2,8); 0,208 (6,1)                         |
|                    | 177       | 6,71 (1) сут                          | $\beta^-$                                                               | 1,31                                          |                                                                    |
|                    | 177 $m$   | 160,9 (3) сут                         | $\beta^-$                                                               | 0,497                                         | } 0,113 (23); 0,208 (62);<br>0,228 (37); 0,378 (29);<br>0,418 (21) |
|                    |           |                                       | $\beta^-$ (78)                                                          | 0,2                                           |                                                                    |
|                    |           |                                       | н. п. (22)                                                              | —                                             | } 0,089; 0,214; 0,326; 0,427<br>0,332                              |
|                    | 178       | 28,4 (2) мин                          | $\beta^-$                                                               | 2,0                                           |                                                                    |
|                    | 178 $m$   | 22,7 (4) мин                          | $\beta^-$                                                               | 1,2                                           | } 0,213<br>0,22; 0,41; 1,11; 1,20                                  |
|                    | 179       | 4,59 (6) ч                            | $\beta^-$                                                               | 1,35                                          |                                                                    |
|                    | 180       | 5,7 (1) мин                           | $\beta^-$                                                               | 2,7; 1,5                                      | } 0,079; 0,342; 0,408<br>0,315                                     |
|                    | 157       | 0,110 (6) с                           | $\alpha$                                                                | 5,735                                         |                                                                    |
|                    | 158       | 2,9 (2) с                             | $\alpha$                                                                | 5,27                                          | } 0,129; 0,17<br>0,115; 0,370; 0,493                               |
|                    | 159       | 5,6 (5) с                             | $\alpha$                                                                | 5,095                                         |                                                                    |
|                    | 161       | 17 (2) с                              | $\alpha$                                                                | 4,60                                          | } 0,120; 0,165; 0,99; 1,28;<br>2,03; 2,36; 2,52; 2,94              |
|                    | 166       | 6,77 (30) мин                         | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             |                                                                    |
|                    | 167       | 2,05 (5) мин                          | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | } 0,122; 0,188; 0,29; 0,34; 0,47;<br>0,66; 0,86; 1,07              |
|                    | 168       | 25,9 мин                              | э. з.                                                                   | —                                             |                                                                    |
|                    |           |                                       | $\beta^+$ (~ 2)                                                         | 1,7                                           | } 0,024 (22); 0,082 (10),<br>0,125** (21)                          |
|                    | 169       | 3,24 (4) мин                          | э. з.                                                                   | —                                             |                                                                    |
|                    | 170       | 16,01 (13) ч                          | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,13** (96); 0,30** (52)<br>—                                    |
|                    | 171       | 12,1 (4) ч                            | э. з.                                                                   | —                                             |                                                                    |
|                    | 172       | 1,87 (3) года                         | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,089 (3,4); 0,343 (85)<br>—                                     |
|                    | 173       | 24,0 (5) ч                            | э. з.                                                                   | —                                             |                                                                    |
|                    | 174       | 2,0 (4) ×<br>× 10 <sup>15</sup> лет   | $\alpha$                                                                | 2,50                                          | } 0,113 (30); 0,208 (81);<br>0,228 (48); 0,378 (37)                |
|                    | 175       | 70 (2) сут                            | 0,162 (2)                                                               | —                                             |                                                                    |
|                    | 176       | } Стабилен                            | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,277; 0,295; 0,327<br>—                                         |
|                    | 177       |                                       | 5,206 (4)                                                               | —                                             |                                                                    |
|                    | 177 $m_1$ |                                       | 18,606 (3)                                                              | —                                             | } 0,113 (30); 0,208 (81);<br>0,228 (48); 0,378 (37)                |
|                    |           | 1,08 (6) с                            | н. п.                                                                   | —                                             |                                                                    |
|                    | 177 $m_2$ | 51,4 (5) мин                          | н. п.                                                                   | —                                             | } 0,277; 0,295; 0,327<br>—                                         |
|                    | 178       | Стабилен                              | 27,297 (3)                                                              | —                                             |                                                                    |



| Эле-<br>мент     | A        | Период полураспада           | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                      |
|------------------|----------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                  |          |                              |                                                                                      | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                                  |
| $^{73}\text{Ta}$ | $178m_1$ | 4,0 с                        | и. п.                                                                                | —                                             | 0,089; 0,213; 0,326; 0,426                                           |
|                  | $178m_2$ | 31 (1) год                   | и. п.                                                                                | —                                             | 0,217; 0,495; 0,574                                                  |
|                  | 179      | Стабилен                     | 13,629 (5)                                                                           | —                                             | —                                                                    |
|                  | $179m_1$ | 18,68 (6) с                  | и. п.                                                                                | —                                             | 0,217 (94)                                                           |
|                  | $179m_2$ | 25,1 (3) сут                 | и. п.                                                                                | —                                             | 0,12; 0,15; 0,36; 0,45                                               |
|                  | 180      | Стабилен                     | 35,100 (6)                                                                           | —                                             | —                                                                    |
|                  | $180m$   | 5,5 (1) ч                    | и. п.                                                                                | —                                             | 0,058 (48); 0,215 (82);<br>0,333 (93); 0,444 (80)                    |
|                  | 181      | 42,4 (1) сут                 | $\beta^-$                                                                            | 0,41                                          | 0,133** (48); 0,346 (13);<br>0,482 (81)                              |
|                  | 182      | 9 (3) · 10 <sup>6</sup> лет  | $\beta^-$                                                                            | 0,2                                           | 0,271 (84)                                                           |
|                  | $182m$   | 61,5 (15) мин                | $\beta^-$ (54), и. п. (46)                                                           | —                                             | 0,224; 0,344; 0,943                                                  |
|                  | 183      | 64 (1) мин                   | $\beta^-$                                                                            | 1,5; 1,2                                      | 0,46/58/; 0,82/100/                                                  |
|                  | 184      | 4,12 (5) ч                   | $\beta^-$                                                                            | 1,1                                           | 0,14; 0,18; 0,34                                                     |
|                  | 167      | 2,9 (15) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | 168      | 2,5 (12) мин                 | $\beta^+$                                                                            | —                                             | 0,124; 0,262; 0,750                                                  |
|                  | 169      | 4,9 (4) мин                  | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | 0,029; 0,154; 0,192                                                  |
|                  | 170      | 6,76 (6) мин                 | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | 0,10; 0,22; 0,86; 0,99                                               |
|                  | 171      | 23,3 (3) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,05; 0,17; 0,50*                                                    |
|                  | 172      | 36,8 (3) мин                 | —                                                                                    | —                                             | 0,092; 0,208; 0,511 (ан.);<br>1,109                                  |
|                  | 173      | 3,65 (5) ч                   | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | 0,090**; 0,170**; 0,64; 1,00                                         |
|                  | 174      | 1,2 (1) ч                    | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | 0,091; 0,125; 0,160; 0,205;<br>0,280; 0,350; 0,511 (ан.)             |
|                  | 175      | 10,5 (2) ч                   | э. з.                                                                                | —                                             | 0,08; 0,13; 0,21; 0,27; 0,35;<br>0,45; 0,60; 0,83; 1,2; 1,4;<br>1,7  |
|                  | 176      | 8,08 (7) ч                   | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | 0,088; 0,202                                                         |
|                  | 177      | 56,6 (1) ч                   | э. з., $\beta^+$                                                                     | —                                             | 0,113 (6); 0,208 (1)                                                 |
|                  | 178      | 9,31 (3) мин                 | э. з. (99)                                                                           | —                                             | } 0,093/100/; 0,511/10, ан./;<br>1,10/11/; 1,35**/46/                |
|                  | 179      | 664,9 (42) сут               | $\beta^+$ (1)                                                                        | 0,89                                          |                                                                      |
|                  | 180      | > 1,0 · 10 <sup>13</sup> лет | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | $180m$   | 8,1 (1) ч                    | 0,012 (2)                                                                            | —                                             | —                                                                    |
|                  | 181      | Стабилен                     | э. з. (87)                                                                           | —                                             | } 0,093 (4); 0,103 (0,6)                                             |
|                  | 182      | 115,0 (2) сут                | $\beta^-$ (13)                                                                       | 1,71                                          |                                                                      |
|                  | $182m_1$ | 0,28 с                       | 99,988 (2)                                                                           | —                                             | —                                                                    |
|                  | $182m_2$ | 15,84 (10) мин               | $\beta^-$                                                                            | 0,71 (0,3); 0,522                             | 0,068 (42); 1,121 (34); 1,221 (27)                                   |
|                  | 183      | 5,1 (1) сут                  | и. п.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | 184      | 8,7 (1) ч                    | и. п.                                                                                | —                                             | 0,147 (40); 0,172 (40); 0,184 (20)                                   |
|                  | 185      | 49 (2) мин                   | $\beta^-$                                                                            | 0,80; 0,62                                    | 0,108 (11); 0,161** (17);<br>0,246** (33); 0,292 (11);<br>0,354 (11) |
|                  | 186      | 10,5 (5) мин                 | $\beta^-$                                                                            | 2,64 (0,2);<br>1,76 (0,9); 1,19               | 0,111 (21); 0,25 (42); 0,30 (24);<br>0,41 (71); 0,90** (49)          |
| $^{74}\text{W}$  | 162      | < 0,25 с                     | $\beta^-$                                                                            | 1,7                                           | 0,175 (60)                                                           |
|                  | 163      | 2,5 (3) с                    | $\beta^-$                                                                            | 2,6; 2,2                                      | 0,20 (74); 0,51 (33); 0,61 (33);<br>0,73 (48)                        |
|                  | 164      | 6,3 (5) с                    | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | 165      | 5,1 с                        | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | 166      | 16 с                         | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | 170      | 4 (1) мин                    | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | 171      | 9,0 (15) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                    |
|                  | 172      | 6,7 (10) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,036; 0,458; 0,624                                                  |
|                  | 173      | 16,5 (5) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,050; 0,071; 0,106; 0,365                                           |
|                  | 174      | 29 мин                       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,035; 0,329; 0,429                                                  |
|                  | 175      | 34 (1) мин                   | э. з.                                                                                | —                                             | 0,26; 0,80; 1,3; 1,6                                                 |
|                  | 176      | 2,3 (1) ч                    | э. з. (> 99)                                                                         | —                                             | } 0,034; 0,100                                                       |
|                  | 177      | 135 (3) мин                  | $\beta^+$ (~ 0,5)                                                                    | —                                             |                                                                      |
|                  | 178      | —                            | э. з.                                                                                | —                                             | 0,20; 0,42; 0,62; 0,83; 1,00                                         |

| Элемент          | A                | Период полураспада         | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                   |
|------------------|------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                  |                  |                            |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                       |
| <sup>75</sup> Re | 178              | 21,7 (3) сут               | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                 |
|                  | 179              | 37,5 (5) мин               | э. з.                                                                   | —                                             | 0,031 (22)                                        |
|                  | 179 <sub>m</sub> | 6,7 (3) мин                | и. п. (> 99),<br>э. з. (0,31)                                           | —                                             | 0,222                                             |
|                  | 180              | 6·10 <sup>14</sup> лет     | 0,13 (3)                                                                | —                                             | —                                                 |
|                  | 181              | 121,2 (3) сут              | э. з.                                                                   | —                                             | 0,006 (1); 0,136 (0,1);<br>0,152 (0,1)            |
|                  | 182              | } Стабилен                 | 26,3 (2)                                                                | —                                             | —                                                 |
|                  | 183              |                            | 14,3 (1)                                                                | —                                             | —                                                 |
|                  | 184              |                            | 30,67 (15)                                                              | —                                             | —                                                 |
|                  | 185              |                            | β <sup>-</sup>                                                          | 0,429                                         | —                                                 |
|                  | 185 <sub>m</sub> |                            | и. п.                                                                   | —                                             | 0,100/16/; 0,13/70/; 0,17/100/                    |
|                  | 186              | Стабилен                   | 28,6 (2)                                                                | —                                             | —                                                 |
|                  | 187              | 23,9 (1) ч                 | β <sup>-</sup>                                                          | 1,31 (15); 0,63                               | 0,479 (23); 0,686 (27)                            |
|                  | 188              | 69,4 (5) сут               | β <sup>-</sup>                                                          | 0,349                                         | 0,227 (0,22); 0,290 (0,40)                        |
|                  | 189              | 11,5 (3) мин               | β <sup>-</sup>                                                          | 2,5; 2,0                                      | 0,258/100/; 0,417/96/                             |
|                  | 190              | 30,0 (15) мин              | β <sup>-</sup>                                                          | 1,0                                           | 0,158; 0,162                                      |
|                  | 170              | ~ 7 с                      | β <sup>+</sup>                                                          | —                                             | 0,156; 0,306; 0,413                               |
|                  | 172              | 48 (12) с                  | э. з.                                                                   | —                                             | 0,123; 0,254; 0,743                               |
|                  | 175              | 5 (1) мин                  | э. з.                                                                   | —                                             | 0,185                                             |
|                  | 176              | 5,7 (8) мин                | э. з.                                                                   | —                                             | 0,109; 0,241                                      |
|                  | 177              | 14,0 (10) мин              | э. з.                                                                   | —                                             | 0,080*; 0,096; 0,197                              |
|                  | 178              | 13,2 (2) мин               | э. з.                                                                   | —                                             | 0,106; 0,237; 0,939                               |
|                  | 179              | 19,7 (5) мин               | э. з., β <sup>+</sup>                                                   | —                                             | 0,29; 0,43; 1,68                                  |
|                  | 180              | 2,43 (6) мин               | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,11; 0,511 (ан.); 0,88; 0,90                   |
|                  |                  |                            | β <sup>+</sup>                                                          | 1,8                                           |                                                   |
|                  | 181              | 20 (1) ч                   | э. з.                                                                   | —                                             | 0,365; 0,639                                      |
|                  | 182              | 64 (5) ч                   | э. з.                                                                   | —                                             | 0,068; 0,100; 1,122; 1,189;<br>1,23**; 2,0; 2,01  |
|                  | 183              | 70,0 (11) сут              | э. з.                                                                   | —                                             | 0,046; 0,053; 0,109**; 0,209;<br>0,246; 0,292     |
|                  | 184              | 38,0 (5) сут               | э. з.                                                                   | —                                             | 0,111; 0,78**; 0,90**                             |
|                  | 184 <sub>m</sub> | 165 (5) сут                | э. з. (25), и. п. (75)                                                  | —                                             | 0,22; 0,25; 0,92                                  |
|                  | 185              | Стабилен                   | 37,40 (2)                                                               | —                                             | —                                                 |
|                  | 186              | 90,64 (9) ч                | β <sup>-</sup> (92,2)                                                   | 1,07                                          | } 0,137 (9); 0,632 (0,03);<br>0,768 (0,035)       |
|                  |                  |                            | э. з. (7,8)                                                             | —                                             |                                                   |
|                  | 186 <sub>m</sub> | 2,0·10 <sup>5</sup> лет    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,040; 0,059; 0,099                               |
|                  | 187              | 5 (2)·10 <sup>10</sup> лет | β <sup>-</sup>                                                          | 0,003                                         | —                                                 |
|                  |                  |                            | 62,60 (2)                                                               | —                                             | —                                                 |
|                  | 188              | 16,98 (2) ч                | β <sup>-</sup>                                                          | 2,12                                          | 0,155 (10); 0,478 (0,6);<br>0,633 (0,9)           |
|                  | 188 <sub>m</sub> | 18,6 (1) мин               | и. п.                                                                   | —                                             | 0,092 (5); 0,106 (10)                             |
|                  | 189              | 24,3 (4) ч                 | β <sup>-</sup>                                                          | 1,00                                          | 0,150* (4); 0,187* (3);<br>0,218* (10); 0,245 (4) |
|                  | 190              | 3,1 (3) мин                | β <sup>-</sup>                                                          | 1,8                                           | 0,191/10/; 0,392/10/; 0,57/10/;<br>0,83/3/        |
|                  | 190 <sub>m</sub> | 3,2 (2) ч                  | β <sup>-</sup> (51), и. п. (~49)                                        | —                                             | 0,187; 0,558; 0,569                               |
|                  | 191              | 9,8 мин                    | β <sup>-</sup>                                                          | 1,8                                           | —                                                 |
|                  | 192              | 16 (1) с                   | β <sup>-</sup>                                                          | 2,5                                           | 0,20; 0,29; 0,37; 0,48; 0,57                      |
| <sup>76</sup> Os | 169              | 3,2 (2) с                  | α                                                                       | 5,57                                          | —                                                 |
|                  | 170              | 7,1 (5) с                  | α                                                                       | 5,40                                          | —                                                 |
|                  | 171              | 8,2 (8) с                  | α                                                                       | 5,24                                          | —                                                 |
|                  | 172              | 19 (2) с                   | э. з. (> 99),<br>α (< 0,3)                                              | 5,11                                          | —                                                 |
|                  | 173              | 16 (5) с                   | э. з. (99,98),<br>α (0,02)                                              | 4,94                                          | —                                                 |
|                  |                  |                            | э. з. (99,98),<br>α (0,02)                                              | 4,76                                          | 0,118; 0,325                                      |
|                  | 174              | 45 (5) с                   | α                                                                       | —                                             | —                                                 |

| Эле-<br>мент | А                 | Период полураспада         | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                 |
|--------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|              |                   |                            |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                     |
| $\pi$ Ir     | 175               | 1,4 (1) мин                | э. з.                                                                                | —                                             | 0,125; 0,181                                                                    |
|              | 176               | 3,0 (7) мин                | э. з.                                                                                | —                                             | 0,776; 1,209; 1,291                                                             |
|              | 177               | 3,5 (8) мин                | э. з.                                                                                | —                                             | 0,085; 0,196                                                                    |
|              | 178               | 5,0 (4) мин                | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                               |
|              | 179               | 6,5 (5) мин                | э. з.                                                                                | —                                             | 0,06; 0,22; 0,60; 0,97; 1,33                                                    |
|              | 180               | 22 (3) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,02                                                                            |
|              | 181               | 2,7 (1) мин                | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,118; 0,145                                                                    |
|              | 182               | 22 (2) ч                   | э. з.                                                                                | —                                             | 0,180/7/; 0,510/10/                                                             |
|              | 183               | 13,0 (5) ч                 | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,114 (27); 0,382 (90)                                                          |
|              | 183m              | 9,9 (3) ч                  | э. з. (89), и. п. (11)                                                               | —                                             | 0,171; 1,035 (6); 1,105** (48)                                                  |
|              | 184               | > 1·10 <sup>17</sup> лет   | 0,02 (1)                                                                             | —                                             | —                                                                               |
|              | 185               | 93,6 (5) сут               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,646 (80); 0,875** (11)                                                        |
|              | 186               | 2 (1)·10 <sup>15</sup> лет | 1,58 (10)                                                                            | —                                             | —                                                                               |
|              |                   |                            | α                                                                                    | 2,76                                          | —                                                                               |
|              | 187               | } Стабилен                 | 1,6 (1)                                                                              | —                                             | —                                                                               |
|              | 188               |                            | 13,3 (2)                                                                             | —                                             | —                                                                               |
|              | 189               |                            | 16,1 (3)                                                                             | —                                             | —                                                                               |
|              | 189m              |                            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,031                                                                           |
|              | 190               |                            | 26,4 (4)                                                                             | —                                             | —                                                                               |
|              | 190m              | 9,9 (1) мин                | и. п.                                                                                | —                                             | 0,187 (70); 0,361 (94);<br>0,502 (98); 0,616 (99)                               |
|              | 191               | 15,4 (1) сут               | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,143                                         | 0,129 (25)                                                                      |
|              | 191m              | 13,10 (5) ч                | и. п.                                                                                | —                                             | 0,074                                                                           |
|              | 192               | Стабилен                   | 41,0 (3)                                                                             | —                                             | —                                                                               |
|              | 192m              | 5,9 (1) с                  | и. п.                                                                                | —                                             | 0,20; 0,30; 0,45; 0,48; 0,57                                                    |
|              | 193               | 30,5 (4) ч                 | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,13                                          | 0,139 (3); 0,28** (2,1);<br>0,460 (3,9); 0,558 (2,1)                            |
|              | 194               | 6,0 (2) лет                | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,053                                         | 0,043 (10); 0,078 (0,03)                                                        |
|              | 195               | 6,5 мин                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 2                                             | —                                                                               |
|              | 196               | 34,9 (2) мин               | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,8                                           | 0,126; 0,408                                                                    |
|              | 169               | 0,4 (1) с                  | α                                                                                    | 6,11                                          | —                                                                               |
|              | 171               | 1,0 (3) с                  | α                                                                                    | 5,91                                          | —                                                                               |
|              | 172               | 1,7 (5) с                  | α                                                                                    | 5,81                                          | —                                                                               |
|              | 173               | 3,0 (1) с                  | α                                                                                    | 5,67                                          | —                                                                               |
|              | 174               | 4 (1) с                    | α                                                                                    | 5,48                                          | —                                                                               |
|              | 175               | 4,5 (10) с                 | α                                                                                    | 5,39                                          | —                                                                               |
|              | 176               | 8 (1) с                    | α                                                                                    | 5,12                                          | —                                                                               |
|              | 177               | 21 (2) с                   | α                                                                                    | 5,01                                          | —                                                                               |
|              | 178               | 22 (2) с                   | э. з.                                                                                | —                                             | 0,132; 0,266; 0,363                                                             |
|              | 179               | 4 (1) мин                  | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                               |
|              | 180               | 1,5 (1) мин                | э. з.                                                                                | —                                             | 0,132; 0,276                                                                    |
|              | 181               | 5 (3) мин                  | э. з.                                                                                | —                                             | 0,05; 0,11; 0,23; 0,32; 1,64                                                    |
|              | 182               | 15 (1) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,133; 0,278; 0,510; 0,912                                                      |
|              | 183               | 57 (4) мин                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,24*                                                                           |
|              | 184               | 3,02 (6) ч                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,125/100/; 0,267/200/;<br>0,392/90/                                            |
|              | 185               | 14 (9) ч                   | э. з.                                                                                | —                                             | 0,101; 0,254; 1,67; 1,83                                                        |
|              | 186               | 15,8 (3) ч                 | э. з. (97)                                                                           | —                                             | } 0,137 (45); 0,297 (74); 0,434(35)                                             |
|              |                   |                            | β <sup>+</sup> (3)                                                                   | 1,94                                          |                                                                                 |
|              | 187               | 10,5 (3) ч                 | э. з.                                                                                | —                                             | 0,18/45/; 0,41/100/; 0,61/45/;<br>0,98/50/                                      |
|              | 188               | 41,5 (5) ч                 | э. з. (> 99)                                                                         | —                                             | } 0,155 (34); 0,633* (29)                                                       |
|              |                   |                            | β <sup>+</sup> (~ 0,3)                                                               | 1,66                                          |                                                                                 |
|              | 189               | 13,2 (1) сут               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,245 (18)                                                                      |
|              | 190               | 11,78 (10) сут             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,187 (51); 0,37** (39);<br>0,40** (39); 0,518 (39);<br>0,56** (72); 0,604 (47) |
|              | 190m <sub>1</sub> | 1,2 ч                      | и. п.                                                                                | —                                             | 0,026                                                                           |
|              | 190m <sub>2</sub> | 3,2 (2) ч                  | э. з. (95),<br>и. п. (5)                                                             | —                                             | 0,175 <sub>1</sub>                                                              |
|              | 191               | Стабилен                   | 37,3 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                               |
|              | 191m              | 4,94 (3) с                 | и. п.                                                                                | —                                             | 0,129; 0,171                                                                    |

| Эле-<br>мент     | А        | Период полураспада        | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                                  |
|------------------|----------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |          |                           |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                                                                      |
| $^{78}\text{Pt}$ | 192      | 73,831 (8) сут            | $\beta^-$ (95,4)<br>э. з. (4,6)                                                      | 0,67<br>—                                     | $\left\{ \begin{array}{l} 0,296 (29); 0,308 (30), \\ 0,317 (81); 0,468 (49) \end{array} \right.$ |
|                  | $192m_1$ | 1,45 (5) мин              | и. п. ( $> 99$ )<br>$\beta^-$ (0,017)                                                | —<br>1,5                                      | $\left\{ \begin{array}{l} 0,058 (0,005); 0,317 (0,008); \\ 0,612 (0,003) \end{array} \right.$    |
|                  | $192m_2$ | 241 (9) год               | и. п.                                                                                | —                                             | 0,155                                                                                            |
|                  | 193      | Стабилен                  | 62,7 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                                                |
|                  | $193m$   | 10,60 (11) сут            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,080                                                                                            |
|                  | 194      | 19,15 (3) ч               | $\beta^-$                                                                            | 2,24                                          | 0,328 (10); 0,64* (1)                                                                            |
|                  | $194m$   | 171 (11) сут              | $\beta^-$                                                                            | 2,3                                           | 0,13; 0,32; 0,63                                                                                 |
|                  | 195      | 2,5 (3) ч                 | $\beta^-$                                                                            | 1,1                                           | 0,099; 0,211                                                                                     |
|                  | $195m$   | 3,8 (2) ч                 | $\beta^-$                                                                            | 1,0                                           | 0,10; 0,13; 0,33; 0,37; 0,43;<br>0,66                                                            |
|                  | 196      | 52 (2) с                  | $\beta^-$                                                                            | 3,2                                           | 0,33; 0,36; 0,45; 0,78                                                                           |
|                  | $196m$   | 1,40 (2) ч                | $\beta^-$                                                                            | 1,2                                           | 0,356 (94); 0,39 (95); 0,44 (95);<br>0,522 (99); 0,65 (100)                                      |
|                  | 197      | 5,8 (5) мин               | $\beta^-$                                                                            | 2,0                                           | 0,50                                                                                             |
|                  | 198      | 8 (1) с                   | $\beta^-$                                                                            | 3,6                                           | 0,407; 0,507                                                                                     |
|                  | 174      | 0,7 (2) с                 | $\alpha$ ( $\sim 80$ )<br>э. з. + $\beta^+$ (20)                                     | 6,043<br>—                                    | —<br>—                                                                                           |
|                  | 175      | 2,1 (2) с                 | $\alpha$ ( $\sim 75$ )                                                               | 5,964                                         | 0,076                                                                                            |
|                  | 176      | 6,33 (15) с               | $\alpha$ (42)<br>э. з. + $\beta^+$ (58)                                              | 5,744<br>—                                    | —<br>—                                                                                           |
|                  | 177      | 11 (2) с                  | $\alpha$ (9)<br>э. з. + $\beta^+$ (91)                                               | 5,527; 5,435<br>—                             | —<br>—                                                                                           |
|                  | 178      | 21,0 (7) с                | $\alpha$ (7)<br>э. з. + $\beta^+$ (93)                                               | 5,458; 5,30<br>—                              | —<br>—                                                                                           |
|                  | 179      | 33 (4) с                  | $\alpha$ (0,27)<br>э. з. + $\beta^+$ ( $> 99$ )                                      | 5,15<br>—                                     | —<br>—                                                                                           |
|                  | 180      | 52 (3) с                  | $\alpha$ ( $\sim 0,3$ )<br>э. з. + $\beta^+$ ( $> 99$ )                              | 5,14<br>—                                     | —<br>—                                                                                           |
|                  | 181      | 51 (5) с                  | $\alpha$ ( $\sim 0,06$ )<br>э. з. + $\beta^+$ ( $> 99$ )                             | 5,02<br>—                                     | —<br>—                                                                                           |
|                  | 182      | 2,6 (1) мин               | э. з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ ( $\sim 0,02$ )                                         | —<br>4,84                                     | $\left\{ \begin{array}{l} 0,136; 0,146; 0,210 \end{array} \right.$                               |
|                  | 183      | 6,6 (9) мин               | э. з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ ( $\sim 0,0013$ )                                       | —<br>4,73                                     | $\left\{ \begin{array}{l} 0,119; 0,265*; 0,307 \end{array} \right.$                              |
|                  | 184      | 17,3 (2) мин              | э. з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ ( $\sim 0,001$ )                                        | —<br>4,50                                     | $\left\{ \begin{array}{l} 0,155; 0,192; 0,548; 0,731 \end{array} \right.$                        |
|                  | 185      | 70,9 (24) мин             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,035; 0,63; 1,56                                                                                |
|                  | 186      | 2,0 (1) ч                 | э. з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ ( $4 \cdot 10^{-4}$ )                                   | —<br>4,23                                     | $\left\{ \begin{array}{l} 0,67* \end{array} \right.$                                             |
|                  | 187      | 2,35 (3) ч                | э. з.                                                                                | —                                             | 0,106; 0,202; 0,285; 0,709                                                                       |
|                  | 188      | 10,2 (3) сут              | э. з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ ( $3 \cdot 10^{-5}$ )                                   | —<br>3,93                                     | $\left\{ \begin{array}{l} 0,140/22/; 0,19**/100/; \\ 0,38/15/ \end{array} \right.$               |
|                  | 189      | 10,89 (11) ч              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,094/120/; 0,141/124/;<br>0,187/137/; 0,243/100/;<br>0,56**/230/; 0,61**/180/;<br>0,722/156/    |
|                  | 190      | $6 (1) \cdot 10^{11}$ лет | $\alpha$<br>0,01 (1)                                                                 | 3,18<br>—                                     | —<br>—                                                                                           |
|                  | 191      | 2,9 (1) сут               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,36** (5); 0,410 (3); 0,539 (9)                                                                 |
|                  | 192      | Стабилен                  | 0,79 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 193      | 50 (9) лет                | э. з.                                                                                | —                                             | —                                                                                                |
|                  | $193m$   | 4,33 (3) сут              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,150                                                                                            |
|                  | 194      | } Стабилен                | 32,9 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 195      |                           | 33,8 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                                                |
|                  | $195m$   | 4,02 (1) сут              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,099 (11); 0,129 (1)                                                                            |
|                  | 196      | Стабилен                  | 25,3 (5)                                                                             | —                                             | —                                                                                                |
|                  | 197      | 18,3 (3) ч                | $\beta^-$                                                                            | 0,670                                         | 0,077 (20); 0,191 (6)                                                                            |
|                  | $197m$   | 94,4 (8) мин              | и. п. (97)<br>$\beta^-$ (3)                                                          | —<br>0,737                                    | $\left\{ \begin{array}{l} 0,279 (2,6); 0,346 (13) \end{array} \right.$                           |

| Элемент          | A                 | Период полураспада | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                               |
|------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                  |                   |                    |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                           |
| <sup>79</sup> Au | 198               | Стабилен           | 7,2 (2)                                                                 | —                                             | —                                             |
|                  | 199               | 30,8 (4) мин       | $\beta^-$                                                               | 1,69                                          | 0,197 (9); 0,32* (8); 0,475* (12); 0,540 (24) |
|                  | 199m              | 13,6 (4) с         | и. п.                                                                   | —                                             | 0,032; 0,392                                  |
|                  | 200               | 12,5 (3) ч         | $\beta^-$                                                               | 0,7; 0,6                                      | 0,08; 0,14; 0,23; 0,24                        |
|                  | 201               | 2,5 (1) мин        | $\beta^-$                                                               | 2,66                                          | 0,15; 0,23; 1,76                              |
|                  | 176               | 1,25 (30) с        | $\alpha$                                                                | 6,29; 6,26                                    | —                                             |
|                  | 177               | 1,3 (4) с          | $\alpha$                                                                | 6,15; 6,12                                    | —                                             |
|                  | 178               | 2,6 (5) с          | $\alpha$                                                                | 5,92                                          | —                                             |
|                  | 179               | 7,5 (4) с          | $\alpha$                                                                | 5,84                                          | —                                             |
|                  | 181               | 11,3 (7) с         | $\alpha$ (1,1)                                                          | 5,60; 5,47                                    | —                                             |
|                  | 182               | 21 (2) с           | э. з. ( $> 99$ ), $\alpha$ ( $\sim 0,04$ )                              | 5,35                                          | 0,155; 0,265; 0,787; 0,855                    |
|                  | 183               | 44 (2) с           | $\alpha$ (0,3)                                                          | 5,34                                          | 0,312                                         |
|                  | 184               | 53,0 (14) с        | э. з. ( $> 99$ ), $\alpha$ (0,022)                                      | 5,17; 5,11                                    | 0,163; 0,273; 0,363                           |
|                  | 185               | 4,3 (1) мин        | э. з. ( $> 99$ ), $\alpha$ (0,09)                                       | 5,07                                          | 0,243; 0,310; 0,332                           |
|                  | 186               | 10,7 (5) мин       | э. з.                                                                   | —                                             | 0,16; 0,22; 0,30; 0,40; 0,76                  |
|                  | 187               | 8,0 (4) мин        | э. з.                                                                   | —                                             | } 0,92; 1,33; 1,41                            |
|                  | 188               | 8,84 (6) мин       | э. з., $\beta^+$                                                        | 4,69                                          |                                               |
|                  | 189               | 28,7 (3) мин       | э. з.                                                                   | —                                             | 0,25; 0,33; 0,63                              |
|                  | 189m              | 4,55 (10) мин      | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | 0,35; 0,45; 0,71; 0,81                        |
|                  | 190               | 42,8 (10) мин      | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | 0,17; 0,32                                    |
|                  | 191               | 3,18 (8) ч         | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             | 0,29**/100/; 0,60**/5/                        |
|                  | 191m              | 0,92 (11) с        | и. п.                                                                   | —                                             | 0,14/10/; 0,30/60/; 0,60/10/                  |
|                  | 192               | 4,94 (9) ч         | э. з.                                                                   | —                                             | 0,267                                         |
|                  | 193               | 17,65 (15) ч       | $\beta^+$ ( $\sim 1$ )                                                  | 2,5                                           | } 0,137; 0,158; 0,296; 0,308;                 |
|                  | 193m              | 3,9 (3) с          | э. з., $\beta^+$                                                        | —                                             |                                               |
|                  | 194               | 39,5 (5) ч         | и. п. ( $> 99$ ), э. з. (0,03)                                          | —                                             | 0,317; 0,612                                  |
|                  | 195               | 183 (2) сут        | э. з. ( $\sim 97$ )                                                     | —                                             | } 0,114** (5); 0,18** (11);                   |
|                  | 195m              | 30,5 (2) с         | $\beta^+$ ( $\sim 3$ )                                                  | 1,49                                          |                                               |
|                  | 196               | 6,183 (10) сут     | и. п.                                                                   | —                                             | 0,26* (9)                                     |
|                  | 196m <sub>1</sub> | 8,1 (2) с          | э. з. (93)                                                              | —                                             | } 0,258 (65)                                  |
|                  | 196m <sub>2</sub> | 9,7 (1) ч          | $\beta^-$ (7)                                                           | 0,26                                          |                                               |
|                  | 197               | Стабилен           | и. п.                                                                   | —                                             | 0,294 (12); 0,328 (68); 1,469                 |
|                  | 197m              | 7,8 (1) с          | и. п.                                                                   | —                                             | } 0,099 (10); 0,129 (1)                       |
|                  | 198               | 2,686 (2) сут      | $\beta^-$                                                               | 0,962                                         |                                               |
|                  | 198m              | 2,30 (4) сут       | и. п.                                                                   | —                                             | 0,261 (77)                                    |
|                  | 199               | 3,139 (7) сут      | $\beta^-$                                                               | 0,46; 0,30                                    | } 0,333 (25); 0,356 (94); 0,426 (6)           |
|                  | 200               | 48,4 (3) мин       | $\beta^-$                                                               | 2,2                                           |                                               |
|                  | 200m              | 18,7 (5) ч         | $\beta^-$ ( $\sim 84$ ), и. п. ( $\sim 16$ )                            | 0,6                                           | 0,085                                         |
|                  | 201               | 26 (1) мин         | $\beta^-$                                                               | 1,3                                           | 0,148 (42); 0,188 (32)                        |
|                  | 202               | 28 (2) с           | $\beta^-$                                                               | 3,5                                           | —                                             |
|                  | 203               | 53 (2) с           | $\beta^-$                                                               | 1,9                                           | 0,130 (8); 0,279 (75)                         |
|                  | 204               | 40 (3) с           | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,412 (95); 0,676 (1)                         |
| <sup>80</sup> Hg | 178               | 0,47 (14) с        | $\alpha$ ( $\sim 84$ ), э. з. ( $\sim 16$ )                             | 6,43                                          | 0,097; 0,180; 0,204; 0,215                    |
|                  | 179               | 1,09 (4) с         | $\alpha$ ( $\sim 53$ ), э. з. ( $\sim 47$ )                             | 6,288                                         | 0,158 (37); 0,208 (8)                         |
|                  | 180               | 2,9 с              | $\alpha$                                                                | 6,120                                         | 0,368 (24); 1,227 (23)                        |
|                  | 181               | 3,6 (3) с          | э. з. (74), $\alpha$ (26)                                               | 6,006; 5,94; 5,92                             | 0,256; 0,368; 0,498; 0,579                    |
|                  | 182               | 11,2 (10) с        | э. з. (91), $\alpha$ (9)                                                | 5,87; 5,70                                    | —                                             |
|                  | 183               | 8,8 (5) с          | э. з. (88), $\alpha$ (12)                                               | 5,905                                         | 0,53; 0,61                                    |
|                  |                   |                    |                                                                         |                                               | 0,44; 1,12; 1,20; 1,31                        |

| Эле-<br>мент | А    | Период полураспада | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                   |
|--------------|------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|
|              |      |                    |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                       |
|              | 184  | 30,6 (3) с         | э. з. (98,7),<br>α (1,3)                                                             | 5,54                                          | 0,156; 0,236; 0,295               |
|              | 185  | 50 (2) с           | э. з. ( $\leq 95$ )<br>α ( $\geq 5$ )                                                | —<br>5,64                                     | } 0,222; 0,258                    |
|              | 186  | 1,38 (10) мин      | э. з. ( $> 99$ ),<br>α (0,016)                                                       | 5,09                                          |                                   |
|              | 187  | 3 мин              | э. з., α                                                                             | —                                             | 0,175; 0,255; 0,40                |
|              | 188  | 3,25 (15) мин      | э. з.                                                                                | —                                             | } 0,115; 0,191                    |
|              |      |                    | α                                                                                    | 4,61                                          |                                   |
|              | 189  | 7,6 (1) мин        | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,165; 0,24; 0,32; 0,50           |
|              | 190  | 20,0 (5) мин       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,14**; 0,17                      |
|              | 191  | 49 (10) мин        | э. з.                                                                                | —                                             | 0,26**                            |
|              | 191m | 50,8 (15) мин      | э. з.                                                                                | —                                             | —                                 |
|              | 192  | 4,85 (20) ч        | э. з., β <sup>+</sup> ( $< 1$ )                                                      | —                                             | 0,114 30/; 0,157/20/;             |
|              |      |                    |                                                                                      | —                                             | 0,274/100/                        |
|              | 193  | 3,80 (15) ч        | э. з.                                                                                | —                                             | 0,187; 0,574; 0,762; 0,855;       |
|              |      |                    |                                                                                      | —                                             | 1,04; 1,08                        |
|              | 193m | 11,8 (2) ч         | э. з. (92), и. п. (8)                                                                | —                                             | 0,141; 0,218; 0,258; 0,574        |
|              | 194  | 260 (40) лет       | э. з.                                                                                | —                                             | —                                 |
|              | 195  | 9,9 (5) ч          | э. з.                                                                                | —                                             | 0,20**; 0,261; 0,59*; 0,780;      |
|              |      |                    |                                                                                      | —                                             | 0,930; 1,110; 1,172               |
|              | 195m | 41,6 (8) ч         | э. з. (50), и. п. (50)                                                               | —                                             | 0,200 (35); 0,261 (20); 0,560(20) |
|              | 196  | Стабилен           | 0,14 (10)                                                                            | —                                             | —                                 |
|              | 197  | 64,14 (5) ч        | э. з.                                                                                | —                                             | 0,077 (18); 0,191 (2)             |
|              | 197m | 23,8 (1) ч         | и. п. (93), э. з. (7)                                                                | —                                             | 0,134 (42); 0,279 (7)             |
|              | 198  | } Стабилен         | 10,02 (7)                                                                            | —                                             | —                                 |
|              | 199  |                    | 16,84 (11)                                                                           | —                                             | —                                 |
|              | 199m | 42,6 (2) мин       | и. п.                                                                                | —                                             | 0,158 (53); 0,375 (15)            |
|              | 200  | } Стабилен         | 23,13 (11)                                                                           | —                                             | —                                 |
|              | 201  |                    | 13,22 (11)                                                                           | —                                             | —                                 |
|              | 202  |                    | 29,80 (14)                                                                           | —                                             | —                                 |
|              | 203  |                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,214                                         | 0,279 (81,5)                      |
|              | 204  | 46,60 (2) сут      | 6,85 (5)                                                                             | —                                             | —                                 |
|              | 205  | Стабилен           | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,7                                           | 0,205                             |
|              | 206  | 5,2 (1) мин        | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,3                                           | 0,31; 0,65                        |
|              | 206  | 8,15 (10) мин      | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | —                                 |
| 81Tl         | 184  | 11 (1) с           | э. з. (98), α (2)                                                                    | 6,16; 5,99                                    | 0,287; 0,340; 0,367               |
|              | 185m | 1,8 (2) с          | α, и. п.                                                                             | 5,97                                          | —                                 |
|              | 186  | 45 (3) с           | э. з. ( $> 99$ ),<br>α $\sim$ (0,006)                                                | 5,77; 5,65                                    | 0,36; 0,40                        |
|              | 186m | 3 с                | и. п.                                                                                | —                                             | —                                 |
|              | 187  | ~ 51 с             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,127; 0,350                      |
|              | 187m | 15,60 (12) с       | и. п., α                                                                             | 5,53                                          | 0,16*; 0,25                       |
|              | 188  | 71 (10) с          | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,413                             |
|              | 189  | 2,3 (2) мин        | э. з.                                                                                | —                                             | 0,334; 0,942                      |
|              | 190  | 3,7 (3) мин        | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,416; 0,625; 0,731               |
|              | 191  | 5,22 (16) мин      | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,22; 0,33*; 0,511 (ан.)          |
|              | 192  | 9,6 (4) мин        | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,424                             |
|              | 193  | 21,6 (8) мин       | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,158; 0,169; 0,178; 0,187;       |
|              |      |                    |                                                                                      | —                                             | 0,208; 0,216; 0,247; 0,511 (ан.)  |
|              | 193m | 2,11 (15) мин      | э. з., и. п.                                                                         | —                                             | 0,208; 0,345; 0,586               |
|              | 194  | 33,0 (5) мин       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,427                             |
|              | 194m | 32,8 (2) мин       | э. з.                                                                                | —                                             | 0,097; 0,427; 0,636; 0,749        |
|              | 195  | 1,16 (5) ч         | э. з.<br>β <sup>+</sup>                                                              | —<br>1,38                                     | } 0,564; 0,885; 1,364             |
|              | 195m | 3,6 (4) с          | и. п.                                                                                | —                                             |                                   |
|              | 196  | 1,84 (3) ч         | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,383 (95)                        |
|              | 196m | 1,41 (2) ч         | э. з. (96,2),<br>и. п. (3,8)                                                         | —                                             | 0,426; 0,611; 0,635               |
|              |      |                    | э. з., β <sup>+</sup>                                                                | —                                             | 0,426; 0,635; 0,695               |
|              | 197  | 2,84 (4) ч         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,152; 0,426                      |
|              | 197m | 0,54 (1) с         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,222 (40); 0,385 (90)            |
|              | 198  | 5,3 (5) ч          | э. з.<br>β <sup>+</sup> ( $\sim 0,7$ )                                               | —<br>2,4                                      | } 0,412 (90); 0,65** (40);        |
|              |      |                    |                                                                                      |                                               |                                   |

| Эле-<br>мент       | A                 | Период полураспада                      | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                    |
|--------------------|-------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|
|                    |                   |                                         |                                                                                      | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                |
| ${}_{82}\text{Pb}$ | 198m              | 1,87 (3) ч                              | э. з. (56), и. п. (44)                                                               | —                                             | 0,283 (30); 0,412 (45);            |
|                    | 199               | 7,42 (8) ч                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,586 (35); 0,635 (35)             |
|                    | 200               | 26,1 (1) ч                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,158 (5); 0,208 (12); 0,247 (9);  |
|                    |                   |                                         | $\beta^+$ (0,37)                                                                     | 1,44 (0,06);<br>1,07 (0,3)                    | 0,455 (14)                         |
|                    | 201               | 73,1 (2) ч                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,368 (88); 0,579 (10);            |
|                    | 202               | 12,23 (2) сут                           | э. з.                                                                                | —                                             | 1,21** (35)                        |
|                    | 203               | Стабилен                                | 29,524 (9)                                                                           | —                                             | 0,135 (2); 0,167 (8)               |
|                    | 204               | 3,78 (2) года                           | $\beta^-$ (97,4)<br>э. з. (2,6)                                                      | 0,766                                         | 0,439 (95); 0,522 (0,1)            |
|                    | 205               | Стабилен                                | 70,476 (9)                                                                           | —                                             | —                                  |
|                    | 206               | 4,20 (2) мин                            | $\beta^-$                                                                            | 1,52                                          | —                                  |
|                    | 206m              | 3,76 (4) мин                            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,216; 0,266; 0,453; 1,021         |
|                    | 207               | 4,77 (2) мин                            | $\beta^-$                                                                            | 1,44                                          | 0,897 (0,16)                       |
|                    | 207m              | 1,33 (11) с                             | и. п.                                                                                | —                                             | 0,35; 1,00                         |
|                    | 208               | 3,07 (2) мин                            | $\beta^-$                                                                            | 2,4; 1,80                                     | 0,583 (86); 2,614 (100)            |
|                    | 209               | 2,20 (7) мин                            | $\beta^-$                                                                            | 1,99                                          | 0,45 (100); 1,56 (100)             |
|                    | 210               | 1,30 (3) мин                            | $\beta^-$                                                                            | 2,3                                           | 0,296 (80); 0,795 (100)            |
|                    | 185               | 4,1 (3) с                               | $\alpha$                                                                             | 6,48; 6,40                                    | —                                  |
|                    | 186               | 7,9 (16) с                              | $\alpha$                                                                             | 6,32                                          | —                                  |
|                    | 187               | 17,5 (36) с                             | $\alpha$                                                                             | 6,08                                          | 0,34*; 0,39                        |
|                    | 188               | 24,5 (15) с                             | э. з. (97), $\alpha$ (3)                                                             | 5,98                                          | 0,185; 0,758                       |
|                    | 189               | 51 (3) с                                | э. з. ( $> 99$ ),<br>$\alpha$ ( $\sim 0,4$ )                                         | 5,72                                          | 0,27—1,11                          |
|                    | 190               | 1,2 (1) мин                             | э. з. ( $> 99$ ),<br>$\alpha$ (0,2)                                                  | 5,577                                         | 0,14; 0,94                         |
|                    | 191               | 1,33 (8) мин                            | э. з. ( $> 99$ ),<br>$\alpha$ (0,013)                                                | 5,29                                          | 0,937                              |
|                    | 192               | 3,5 (1) мин                             | э. з. ( $> 99$ ),<br>$\alpha$ (0,007)                                                | 5,06                                          | 0,17; 0,61; 1,20                   |
|                    | 193               | 5,8 (2) мин                             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,39; 0,72; 0,94                   |
|                    | 194               | 11 (2) мин                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,204                              |
|                    | 195               | 15,8 (2) мин                            | э. з.                                                                                | —                                             | 0,39*; 0,71; 0,88                  |
|                    | 196               | 37 (3) мин                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,192; 0,240; 0,253; 0,367;        |
|                    |                   |                                         |                                                                                      |                                               | 0,503                              |
|                    | 197               | 10 (2) мин                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,375; 0,386; 0,894                |
|                    | 197m              | 44,6 (9) мин                            | э. з. (81), и. п. (19)                                                               | —                                             | 0,085; 0,222; 0,234; 0,386*        |
|                    | 198               | 2,40 (10) ч                             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,173 (28); 0,290 (16); 0,38**(40) |
|                    | 199               | 90 (10) мин                             | э. з.                                                                                | —                                             | 0,353 (17); 0,367 (80)             |
|                    |                   |                                         | $\beta^+$                                                                            | 2,8                                           |                                    |
|                    | 199m              | 12,2 (3) мин                            | и. п. (93), э. з. (7)                                                                | —                                             | 0,424 (20)                         |
|                    | 200               | 21,5 (4) ч                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,109; 0,146*; 0,236; 0,26**;      |
|                    |                   |                                         |                                                                                      |                                               | 0,290*; 0,450                      |
|                    | 201               | 9,4 (2) ч                               | э. з.                                                                                | —                                             | 0,330; 0,361; 0,406; 0,585;        |
|                    |                   |                                         | $\beta^+$                                                                            | 0,55                                          | 0,766; 0,907; 0,946                |
|                    | 201m              | 61 с                                    | и. п.                                                                                | —                                             | 0,629 (51)                         |
|                    | 202               | $\sim 3 \cdot 10^5$ лет                 | э. з.                                                                                | —                                             | —                                  |
|                    | 202m              | 3,62 (3) ч                              | и. п. (90,5),<br>э. з. (9,5)                                                         | —                                             | 0,422 (90); 0,658 (35);            |
|                    |                   |                                         |                                                                                      |                                               |                                    |
|                    | 203               | 52,1 (2) ч                              | э. з.                                                                                | —                                             | 0,787 (45); 0,961 (90)             |
|                    | 203m <sub>1</sub> | 6,3 (2) с                               | и. п.                                                                                | —                                             | 0,279 (81); 0,401 (5)              |
|                    | 203m <sub>2</sub> | 0,48 (2) с                              | и. п.                                                                                | —                                             | 0,825 (70)                         |
|                    | 204               | $> 1,4 \cdot 10^{17}$ лет               | 1,4 (1)                                                                              | —                                             | —                                  |
|                    | 204m              | 67,2 (3) мин                            | и. п.                                                                                | —                                             | 0,375 (93); 0,90* (189)            |
|                    | 205               | 1,43 (14) $\times$<br>$\times 10^7$ лет | э. з.                                                                                | —                                             | —                                  |
|                    | 206               | Стабилен                                | 24,1 (1)                                                                             | —                                             | —                                  |
|                    | 207               |                                         | 22,1 (1)                                                                             | —                                             | —                                  |
|                    | 207m              |                                         | и. п.                                                                                | —                                             | 0,579 (98); 1,064 (83)             |

| Элемент          | A                 | Период полураспада           | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                   |
|------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                  |                   |                              |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                                       |
| <sup>83</sup> Bi | 208               | Стабилен                     | 52,4 (1)                                                                | —                                             | —                                                 |
|                  | 209               | 3,253 (14) ч                 | β <sup>-</sup>                                                          | 0,635                                         | —                                                 |
|                  | 210               | 22,3 (2) года                | β <sup>-</sup> (> 99)<br>α (1,7·10 <sup>-6</sup> )                      | 0,061<br>3,72                                 | } 0,047 (4)                                       |
|                  | 211               | 36,1 (2) мин                 | β <sup>-</sup>                                                          | 1,36                                          |                                                   |
|                  | 212               | 10,64 (1) ч                  | β <sup>-</sup>                                                          | 0,58                                          | 0,405 (3,4); 0,427 (1,8);                         |
|                  | 213               | 10,2 (3) мин                 | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | 0,832 (3,4)                                       |
|                  | 214               | 26,8 мин                     | β <sup>-</sup>                                                          | 1,03 (6); 0,67                                | 0,239 (47); 0,300 (3,2)                           |
|                  | 189               | < 1,5 с                      | α                                                                       | 6,67                                          | —                                                 |
|                  | 190               | 5,4 (5) с                    | α (~ 90)                                                                | 6,45                                          | —                                                 |
|                  | 191               | 13 (1) с                     | α (~ 40)                                                                | 6,32                                          | —                                                 |
|                  | 192               | 42 (5) с                     | α (~ 20)                                                                | 6,06                                          | —                                                 |
|                  | 193               | 64 (4) с                     | α (~ 60)                                                                | 5,90                                          | —                                                 |
|                  | 193m              | 3,5 с                        | α (~ 25)                                                                | 6,48                                          | —                                                 |
|                  | 194               | 105 (15) с                   | э. з. (> 99)<br>α (< 0,2)<br>α (< 0,2)                                  | —<br>5,61<br>5,43                             | } 0,280; 0,575; 0,965                             |
|                  | 195               | 170 (20) с                   | α (4)                                                                   | 6,11                                          |                                                   |
|                  | 195m              | 90 (5) с                     | э. з.                                                                   | —                                             | —                                                 |
|                  | 196               | 4,6 (5) мин                  | э. з.                                                                   | —                                             | 0,372; 0,688; 1,049                               |
|                  | 197 (m)           | 9,5 (10) мин                 | α (0,11), э. з. (> 99)                                                  | 5,77                                          | —                                                 |
|                  | 198               | 11,85 (18) мин               | э. з.                                                                   | —                                             | 0,20; 0,32; 0,56; 1,06                            |
|                  | 198m              | 7,7 (5) с                    | и. п.                                                                   | —                                             | 0,248                                             |
|                  | 199               | 27 (1) мин                   | э. з. (> 99)<br>α (~ 0,01)                                              | —<br>5,53                                     | } 0,425; 0,837; 0,842; 0,946                      |
|                  | 199m              | 24,70 (15) мин               | α                                                                       | 5,484                                         |                                                   |
|                  | 200               | 36,4 (5) мин                 | э. з.                                                                   | —                                             | 0,245; 0,420; 0,462; 1,027                        |
|                  | 200m              | 31 (2) мин                   | э. з., β <sup>+</sup>                                                   | —                                             | 0,420; 0,462; 1,027                               |
|                  | 201               | 108 (3) мин                  | э. з.                                                                   | —                                             | 0,629; 0,786; 0,936; 1,014                        |
|                  | 201m              | ~ 60 мин                     | э. з., и. п.<br>α (> 0,02)                                              | —<br>5,28                                     | —                                                 |
|                  | 202               | 1,72 (5) ч                   | э. з., β <sup>+</sup>                                                   | —                                             | 0,422; 0,961                                      |
|                  | 203               | 11,76 (5) ч                  | э. з., α<br>β <sup>+</sup>                                              | —<br>1,35                                     | } 0,82** (78); 1,52** (31);<br>1,87* (35)         |
|                  | 204               | 11,22 (10) ч                 | э. з.                                                                   | —                                             |                                                   |
|                  | 205               | 15,31 (4) сут                | э. з.<br>β <sup>+</sup> (0,06)                                          | —<br>0,98                                     | } 0,703 (28); 0,988 (17); 1,766 (27)              |
|                  | 206               | 6,243 (3) сут                | э. з., β <sup>+</sup>                                                   | —                                             |                                                   |
|                  | 207               | 38 (3) лет                   | э. з., β <sup>+</sup>                                                   | —                                             | 0,516 (46); 0,538 (34);                           |
|                  | 208               | 3,68 (4)·10 <sup>5</sup> лет | э. з.                                                                   | —                                             | 0,803 (99); 0,880 (72)                            |
|                  | 209               | Стабилен                     | 100                                                                     | —                                             | 0,570 (98); 1,064 (77); 1,770                     |
|                  | 210               | 5,013 (5) сут                | β <sup>-</sup> (> 99)<br>α (1,3·10 <sup>-4</sup> )                      | 1,160<br>4,69; 4,65                           | } 2,614 (100)                                     |
|                  | 210m              | 3,0 (1)·10 <sup>6</sup> лет  | α (99,6)                                                                | 4,96 (58); 4,92 (36);<br>4,57 (6)             |                                                   |
|                  | 211               | 2,14 (2) мин                 | β <sup>-</sup> (0,4)<br>α (99,72)<br>β <sup>-</sup> (0,28)              | —<br>6,62 (84); 6,28 (16)<br>—                | } 0,262 (45); 0,30 (23); 0,34; 0,61<br>0,351 (14) |
|                  | 212               | 60,55 (6) мин                | β <sup>-</sup> (64)<br>α (36)                                           | 2,25<br>6,09 (10); 6,05 (26)                  |                                                   |
|                  | 212m <sub>1</sub> | 25 мин                       | α (< 93), β <sup>-</sup> (> 7)                                          | —                                             | 0,04 (2); 0,288 (0,5);                            |
|                  | 212m <sub>2</sub> | 9 мин                        | β <sup>-</sup> (< 100)                                                  | —                                             | 0,46** (0,8);                                     |
|                  | 213               | 45,59 (6) мин                | β <sup>-</sup> (97,8)<br>α (2,2)                                        | 1,39<br>5,87                                  | } 0,727 (7); 0,785 (1,1); 1,620 (1,8)<br>0,437    |
|                  | 214               | 19,9 (4) мин                 | β <sup>-</sup> (> 99)<br>α (0,021)                                      | 3,26<br>5,45 (0,012);<br>5,51 (0,008)         |                                                   |
|                  | 215               | 7 мин                        | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | —                                                 |



| Эле-<br>мент     | А       | Период полураспада                  | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                    |
|------------------|---------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|
|                  |         |                                     |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                        |
| <sup>84</sup> Po | 192     | 0,034 (3) с                         | α                                                                                    | 7,18                                          | —                                  |
|                  | 193     | 0,45 (15) с                         | α                                                                                    | 6,94                                          | —                                  |
|                  | 194     | 0,6 (2) с                           | α                                                                                    | 6,85                                          | —                                  |
|                  | 195     | 4,5 (5) с                           | α                                                                                    | 6,609                                         | —                                  |
|                  | 195 (m) | 2,0 (2) с                           | α                                                                                    | 6,699                                         | —                                  |
|                  | 196     | 5,5 (5) с                           | α                                                                                    | 6,520                                         | —                                  |
|                  | 197     | 56 (3) с                            | α (90)                                                                               | 6,281                                         | —                                  |
|                  | 197m    | 26 (2) с                            | α                                                                                    | 6,385                                         | —                                  |
|                  | 198     | 1,76 (3) мин                        | α (70)                                                                               | 6,183                                         | —                                  |
|                  |         |                                     | э. з. (30)                                                                           | —                                             | —                                  |
|                  | 199     | 5,2 (1) мин                         | э. з. (88)                                                                           | —                                             | } 0,362; 1,021; 1,034              |
|                  |         |                                     | α (12)                                                                               | 5,952                                         |                                    |
|                  | 199m    | 4,2 (1) мин                         | э. з. (61)                                                                           | —                                             | } 0,500; 1,002                     |
|                  |         |                                     | α (39)                                                                               | 6,059                                         |                                    |
|                  | 200     | 11,5 (1) мин                        | э. з. (86)                                                                           | —                                             | } 0,434; 0,671; 0,797              |
|                  |         |                                     | α (14)                                                                               | 5,863                                         |                                    |
|                  | 201     | 15,3 (2) мин                        | э. з. (98,4)                                                                         | —                                             | } 0,890; 0,905                     |
|                  |         |                                     | α (1,6)                                                                              | 5,683                                         |                                    |
|                  | 201m    | 8,9 (2) мин                         | и. п. (40), э. з. (57)                                                               | —                                             | } 0,412; 0,967                     |
|                  |         |                                     | α (2,9)                                                                              | 5,786                                         |                                    |
|                  | 202     | 44,7 (5) мин                        | э. з. (98)                                                                           | —                                             | } 0,166; 0,316; 0,689; 0,717;      |
|                  |         |                                     | α (2)                                                                                | 5,587                                         |                                    |
|                  | 203     | 36,7 (5) мин                        | э. з. (~ 100)                                                                        | —                                             | } 0,215; 0,894; 0,909; 1,091       |
|                  |         |                                     | α (0,11)                                                                             | 5,384                                         |                                    |
|                  | 203m    | 1,2 (2) мин                         | и. п. (96), э. з. (4)                                                                | —                                             | } 0,262; 0,577; 0,905              |
|                  | 204     | 3,53 (2) ч                          | э. з. (> 99)                                                                         | —                                             |                                    |
|                  |         |                                     | α (0,6)                                                                              | 5,377                                         | } 0,270; 0,884; 1,016              |
|                  | 205     | 1,80 (4) ч                          | э. з. (> 99)                                                                         | —                                             |                                    |
|                  |         |                                     | α (0,5)                                                                              | 5,22                                          | } 0,837; 0,850; 0,872; 1,001       |
|                  | 206     | 8,8 (1) сут                         | э. з. (94,5)                                                                         | —                                             |                                    |
|                  |         |                                     | α (5,5)                                                                              | 5,223                                         | } 0,286/35/; 0,338/40/;            |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               |                                    |
|                  | 207     | 350 (4) мин                         | э. з. (> 99)                                                                         | —                                             | } 0,25/5/; 0,35/4/; 0,41/13/;      |
|                  |         |                                     | α (0,008)                                                                            | 5,116                                         |                                    |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               | } 0,74/36/;                        |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               |                                    |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               | } 0,95/84/; 1,15/6/; 1,37/4/;      |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               |                                    |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               | } 2,06/1,6/                        |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               |                                    |
|                  | 207m    | 2,8 (2) с                           | и. п.                                                                                | —                                             | } 0,26 (42); 0,31 (40); 0,82 (100) |
|                  | 208     | 2,898 (2) года                      | α (> 99)                                                                             | 5,115                                         |                                    |
|                  |         |                                     | э. з. (0,0018)                                                                       | —                                             | } 0,285 (0,003); 0,60** (0,006)    |
|                  |         |                                     |                                                                                      |                                               |                                    |
|                  | 209     | 102 (5) года                        | α (99,74)                                                                            | 4,881 (99)                                    | } 0,261** (0,4); 0,91 (0,5)        |
|                  |         |                                     | э. з. (0,26)                                                                         | —                                             |                                    |
|                  | 210     | 138,376 (2) сут                     | α                                                                                    | 5,305 (100)                                   | } 0,803 (0,0011)                   |
|                  | 211     | 0,516 (3) с                         | α                                                                                    | 7,45 (99)                                     |                                    |
|                  | 211m    | 25,2 (6) с                          | α                                                                                    | 8,88 (7); 7,28 (91)                           | } 0,570 (0,5); 0,90 (0,5)          |
|                  | 212     | 2,98 (3) · 10 <sup>-7</sup> с       | α                                                                                    | 8,78 (100)                                    |                                    |
|                  | 212m    | 45,1 (6) с                          | α                                                                                    | 11,65 (97)                                    | } 0,57 (2); 2,61 (2,6)             |
|                  | 213     | 4,2 (8) · 10 <sup>-6</sup> с        | α                                                                                    | 8,38                                          |                                    |
|                  | 214     | 1,64 (2) · 10 <sup>-4</sup> с       | α                                                                                    | 7,69 (100)                                    | —                                  |
|                  | 215     | 1,780 (4) ×<br>× 10 <sup>-3</sup> с | α (> 99)                                                                             | 7,38 (100)                                    | —                                  |
|                  |         |                                     | β <sup>-</sup> (0,00023)                                                             | —                                             | —                                  |
|                  | 216     | 0,15 (1) с                          | α                                                                                    | 6,78 (100)                                    | —                                  |
|                  | 217     | < 10 с                              | α                                                                                    | 6,55                                          | —                                  |
|                  | 218     | 3,05 мин                            | α (> 99)                                                                             | 6,00 (100)                                    | —                                  |
|                  |         |                                     | β <sup>-</sup> (0,018)                                                               | —                                             | —                                  |
| <sup>85</sup> At | 196     | 0,3 (1) с                           | α                                                                                    | 7,06                                          | —                                  |
|                  | 197     | 0,4 (1) с                           | α                                                                                    | 6,959                                         | —                                  |

| Элемент          | A    | Период полураспада        | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                     |
|------------------|------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                           |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                                 |
| $^{86}\text{Rn}$ | 198  | 4,9 (5) с                 | $\alpha$                                                                | 6,755                                         | —                                                                   |
|                  | 198m | 1,5 (3) с                 | $\alpha$                                                                | 6,849                                         | —                                                                   |
|                  | 199  | 7,0 (1) с                 | $\alpha$                                                                | 6,643                                         | —                                                                   |
|                  | 200  | 43 (2) с                  | $\alpha$ (53)                                                           | 6,47; 6,42                                    | —                                                                   |
|                  |      |                           | э. з. (47)                                                              | —                                             | —                                                                   |
|                  | 201  | 89 (3) с                  | $\alpha$ (71)                                                           | 6,344                                         | —                                                                   |
|                  |      |                           | э. з. (29)                                                              | —                                             | —                                                                   |
|                  | 202  | 181 (3) с                 | э. з. (85)                                                              | —                                             | } 0,441; 0,570; 0,675                                               |
|                  |      |                           | $\alpha$ (15)                                                           | 6,23 (4,3); 6,12 (8)                          |                                                                     |
|                  | 203  | 7,37 (20) мин             | э. з. (69)                                                              | —                                             | } 0,639; 1,002; 1,034                                               |
|                  |      |                           | $\alpha$ (31)                                                           | 6,088                                         |                                                                     |
|                  | 204  | 9,2(2) мин                | э. з. (95,6)                                                            | —                                             | } 0,425; 0,515; 0,683                                               |
|                  |      |                           | $\alpha$ (4,4)                                                          | 5,951                                         |                                                                     |
|                  | 205  | 26,2 (5) мин              | э. з. (90)                                                              | —                                             | } 0,629; 0,669; 0,719                                               |
|                  |      |                           | $\alpha$ (10)                                                           | 5,902                                         |                                                                     |
|                  | 206  | 29,4 (3) мин              | э. з. (99)                                                              | —                                             | } 0,068(10), 0,396; 0,477; 0,701                                    |
|                  |      |                           | $\alpha$ (1)                                                            | 5,703                                         |                                                                     |
|                  | 207  | 1,80 (4) ч                | э. з. ( $\sim$ 90)                                                      | —                                             | } 0,301; 0,588; 0,815                                               |
|                  |      |                           | $\alpha$ ( $\sim$ 10)                                                   | 5,759                                         |                                                                     |
|                  | 208  | 1,63 (3) ч                | э. з. (99,4)                                                            | —                                             | } 0,18 (25); 0,25; 0,66 (100)                                       |
|                  |      |                           | $\alpha$ (0,6)                                                          | 5,65                                          |                                                                     |
|                  | 209  | 5,41 (5) ч                | э. з. (95,9)                                                            | —                                             | } 0,195 (23); 0,545 (62); 0,780 (94)                                |
|                  |      |                           | $\alpha$ (4,1)                                                          | 5,647                                         |                                                                     |
|                  | 210  | 8,1 (4) ч                 | э. з. (99,82)                                                           | —                                             | } 0,245 (79); 1,180 (100);<br>1,436 (29); 1,483 (48);<br>1,599 (14) |
|                  |      |                           | $\alpha$ (0,18)                                                         | 5,52 (0,05);<br>5,44 (0,05);<br>5,36 (0,06)   |                                                                     |
|                  | 211  | 7,214 (7) ч               | э. з. (58,1)                                                            | —                                             |                                                                     |
|                  |      |                           | $\alpha$ (41,9)                                                         | 5,868                                         |                                                                     |
|                  | 212  | 0,314 (2) с               | $\alpha$                                                                | 7,66 (80); 7,60 (20)                          | 0,063                                                               |
|                  | 212m | 0,119 (3) с               | $\alpha$                                                                | 7,88 (20); 7,82 (80)                          | 0,063                                                               |
|                  | 213  | 1,1 (2) $\cdot 10^{-7}$ с | $\alpha$                                                                | 9,08                                          | —                                                                   |
|                  | 214  | 2 $\cdot 10^{-6}$ с       | $\alpha$                                                                | 8,78 (99)                                     | —                                                                   |
|                  | 215  | 1 $\cdot 10^{-4}$ с       | $\alpha$                                                                | 8,026                                         | —                                                                   |
|                  | 216  | 3 $\cdot 10^{-4}$ с       | $\alpha$                                                                | 7,80 (97); 7,70                               | —                                                                   |
|                  | 217  | 0,0323 (4) с              | $\alpha$ ( $>$ 99)                                                      | 7,069                                         | —                                                                   |
|                  |      |                           | $\beta^-$ (0,012)                                                       | —                                             | —                                                                   |
|                  | 218  | $\sim$ 2 с                | $\alpha$ (99,9)                                                         | 6,70 (94); 6,65 (6)                           | —                                                                   |
|                  |      |                           | $\beta^-$ (0,1)                                                         | —                                             | —                                                                   |
|                  | 219  | 0,9 (1) мин               | $\alpha$ ( $\sim$ 97)                                                   | 6,27                                          | —                                                                   |
|                  |      |                           | $\beta^-$ ( $\sim$ 3)                                                   | —                                             | —                                                                   |
|                  | 200  | 1,0 (2) с                 | $\alpha$                                                                | 6,91                                          | —                                                                   |
|                  | 201  | 7,0 (4) с                 | $\alpha$                                                                | 6,72                                          | —                                                                   |
|                  | 202  | 9,85 (20) с               | $\alpha$ ( $>$ 70)                                                      | 6,64                                          | —                                                                   |
|                  | 203  | 45 (3) с                  | $\alpha$ (65)                                                           | 6,498                                         | —                                                                   |
|                  |      |                           | э. з. (35)                                                              | —                                             | —                                                                   |
|                  | 203m | 28 (2) с                  | $\alpha$                                                                | 6,548                                         | —                                                                   |
|                  | 204  | 1,24 (3) мин              | $\alpha$ ( $\sim$ 72)                                                   | 6,417                                         | —                                                                   |
|                  |      |                           | э. з. ( $\sim$ 28)                                                      | —                                             | —                                                                   |
|                  | 205  | 2,83 мин                  | э. з. (77)                                                              | —                                             | } 0,265; 0,465; 0,620                                               |
|                  |      |                           | $\alpha$ (23)                                                           | 6,263                                         |                                                                     |
|                  | 206  | 5,67 (17) мин             | $\alpha$ (64)                                                           | 6,260                                         | } 0,325; 0,387; 0,498                                               |
|                  |      |                           | э. з. (36)                                                              | —                                             |                                                                     |
|                  | 207  | 9,3 (2) мин               | э. з. (77)                                                              | —                                             | } 0,345; 0,747                                                      |
|                  |      |                           | $\alpha$ (23)                                                           | 6,133                                         |                                                                     |
|                  | 208  | 24,35 (13) мин            | $\alpha$ (52)                                                           | 6,141                                         | } 0,251; 0,287; 0,350; 0,952                                        |
|                  |      |                           | э. з. (48)                                                              | —                                             |                                                                     |

| Элемент                | A       | Период полураспада          | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                              |
|------------------------|---------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                        |         |                             |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                                          |
| ${}^{\gamma}\text{Fr}$ | 209     | 28,5 (10) мин               | $\alpha$ з. (83)<br>$\alpha$ (17)                                       | —<br>6,039                                    | } 0,338; 0,408; 0,689; 0,746                                                 |
|                        | 210     | 2,4 (1) ч                   | $\alpha$ (96)<br>$\alpha$ з. (4)                                        | 6,040<br>—                                    |                                                                              |
|                        | 211     | 14,6 (2) ч                  | $\alpha$ з. (74)<br>$\alpha$ (26)                                       | —<br>5,85 (9); 5,78 (17)                      | } 0,445 (29); 0,680 (74);<br>0,865 (18); 0,946 (21);<br>1,13 (23); 1,37 (38) |
|                        | 212     | 24 (2) мин                  | $\alpha$                                                                | 6,264                                         |                                                                              |
|                        | 213     | 0,025 (2) с                 | $\alpha$                                                                | 8,09                                          | —                                                                            |
|                        | 214     | $2,7 (2) \cdot 10^{-7}$ с   | $\alpha$                                                                | 9,04                                          | —                                                                            |
|                        | 215     | $2,30 (10) \cdot 10^{-6}$ с | $\alpha$                                                                | 8,67                                          | —                                                                            |
|                        | 216     | $4,5 (5) \cdot 10^{-5}$ с   | $\alpha$                                                                | 8,05                                          | —                                                                            |
|                        | 217     | $5,4 (5) \cdot 10^{-4}$ с   | $\alpha$                                                                | 7,740                                         | —                                                                            |
|                        | 218     | 0,035 (5) с                 | $\alpha$                                                                | 7,14 (99,8)                                   | 0,609 (0,2)                                                                  |
|                        | 219     | 3,96 (1) с                  | $\alpha$                                                                | 6,82 (81); 6,55 (11);<br>6,42 (8)             | 0,272 (9); 0,401 (5)                                                         |
|                        | 220     | 55,6 (1) с                  | $\alpha$                                                                | 6,29 (100)                                    | 0,55 (0,07)                                                                  |
|                        | 221     | 25 (2) мин                  | $\beta^-$ ( $\sim 80$ )<br>$\alpha$ ( $\sim 20$ )                       | 1,1; 0,8<br>6,037; 5,788; 5,778               | } 0,150; 0,186<br>0,510 (0,07)                                               |
|                        | 222     | 3,8235 (3) сут              | $\alpha$                                                                | 5,49 (100)                                    |                                                                              |
|                        | 223     | 43 (5) мин                  | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                                                            |
|                        | 224     | 107 (3) мин                 | $\beta^-$                                                               | —                                             | 0,261; 0,266                                                                 |
|                        | 225     | 4,5 (3) мин                 | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                                                            |
|                        | 226     | 6,0 (5) мин                 | $\beta^-$                                                               | —                                             | —                                                                            |
|                        | 202     | 0,34 (4) с                  | $\alpha$                                                                | 7,251                                         | —                                                                            |
|                        | 203     | 0,7 (3) с                   | $\alpha$                                                                | 7,132                                         | —                                                                            |
|                        | 204     | 2,1 (2) с                   | $\alpha$                                                                | 7,028; 6,970                                  | —                                                                            |
|                        | 205     | 3,7 (1) с                   | $\alpha$                                                                | 6,916                                         | —                                                                            |
|                        | 206     | 16,0 (1) с                  | $\alpha$ (85)<br>$\alpha$ з. (15)                                       | 6,790<br>—                                    | } 0,559; 0,575; 0,629                                                        |
|                        | 207     | 14,8 (1) с                  | $\alpha$ (93)<br>$\alpha$ з. (7)                                        | 6,767<br>—                                    |                                                                              |
|                        | 208     | 59,0 (20) с                 | $\alpha$ (74)<br>$\alpha$ з. (26)                                       | 6,636<br>—                                    | } 0,325; 0,636; 0,779                                                        |
|                        | 209     | 50,0 (3) с                  | $\alpha$ (89)<br>$\alpha$ з. (11)                                       | 6,648<br>—                                    |                                                                              |
|                        | 210     | 3,18 (6) мин                | $\alpha$<br>$\alpha$ з.                                                 | 6,543<br>—                                    | } 0,644; 0,817                                                               |
|                        | 211     | 3,10 (2) мин                | $\alpha$ , $\alpha$ з.                                                  | 6,535                                         |                                                                              |
|                        | 212     | 20,0 (6) мин                | $\alpha$ з. (56)<br>$\alpha$ (44)                                       | —<br>6,42 (16); 6,39 (17);<br>6,35 (11)       | } 0,281; 0,540; 0,918<br>0,227; 1,185; 1,274                                 |
|                        | 213     | 34,6 (3) с                  | $\alpha$ (99,45)<br>$\alpha$ з. (0,55)                                  | 6,775<br>—                                    |                                                                              |
|                        | 214     | 0,005 (2) с                 | $\alpha$                                                                | 8,426; 8,356                                  | —                                                                            |
|                        | 214 $m$ | 0,00335 (5) с               | $\alpha$                                                                | 8,547; 8,477                                  | —                                                                            |
|                        | 215     | $9 (1) \cdot 10^{-8}$ с     | $\alpha$                                                                | 9,36                                          | —                                                                            |
|                        | 216     | $70 (2) \cdot 10^{-8}$ с    | $\alpha$                                                                | 9,01                                          | —                                                                            |
|                        | 217     | $22 (5) \cdot 10^{-6}$ с    | $\alpha$                                                                | 8,315                                         | —                                                                            |
|                        | 218     | $7 (6) \cdot 10^{-4}$ с     | $\alpha$                                                                | 7,85 (93); 7,57                               | —                                                                            |
|                        | 219     | 0,021 (1) с                 | $\alpha$                                                                | 7,313                                         | —                                                                            |
|                        | 220     | 27,4 (3) с                  | $\alpha$ (99,65)<br>$\beta^-$ (0,35)                                    | 6,68 (85); 6,64 (13)<br>—                     | } 0,045; 0,106; 0,162<br>0,218 (14)                                          |
|                        | 221     | 4,9 (2) мин                 | $\alpha$                                                                | 6,34 (82); 6,12 (15)                          |                                                                              |
|                        | 222     | 14,4 (4) мин                | $\beta^-$ ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,01—0,1)                             | 1,8<br>—                                      | —                                                                            |
|                        | 223     | 21,8 (4) мин                | $\beta^-$ ( $> 99$ )<br>$\alpha$ ( $\sim 0,005$ )                       | 1,15<br>5,34                                  | } 0,050 (40); 0,080 (13); 0,234 (4)                                          |
|                        | 224     | 2,67 (20) мин               | $\beta^-$                                                               | 2,8; 2,6                                      |                                                                              |
|                        | 225     | 3,9 (2) мин                 | $\beta^-$                                                               | 1,6                                           | —                                                                            |

| Эле-<br>мент     | A   | Период полураспада             | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                  |
|------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                  |     |                                |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                                      |
| <sup>86</sup> Ra | 226 | 48 (1) с                       | β <sup>-</sup>                                                                       | 3,5; 3,2                                      | 0,186; 0,254; 1,323                              |
|                  | 227 | 2,4 (2) мин                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 2,4; 1,8                                      | 0,090; 0,586                                     |
|                  | 228 | 39 (1) с                       | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,474                                            |
|                  | 229 | 50 (20) с                      | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,310                                            |
|                  | 206 | 0,4 (2) с                      | α                                                                                    | 7,272                                         | —                                                |
|                  | 207 | 1,3 (2) с                      | α                                                                                    | 7,133                                         | —                                                |
|                  | 208 | 1,3 (2) с                      | α                                                                                    | 7,13                                          | —                                                |
|                  | 209 | 4,6 (2) с                      | α                                                                                    | 7,010                                         | —                                                |
|                  | 210 | 3,7 (2) с                      | α                                                                                    | 7,019                                         | —                                                |
|                  | 211 | 13 (2) с                       | α                                                                                    | 6,911                                         | —                                                |
|                  | 212 | 13,0 (2) с                     | α                                                                                    | 6,9001                                        | —                                                |
|                  | 213 | 2,74 (6) мин                   | α (80), э. з. (20)                                                                   | 6,73; 6,62                                    | 0,110; 0,215                                     |
|                  | 214 | 2,46 (3) с                     | α (> 99),<br>э. з. (0,059)                                                           | 7,136                                         | —                                                |
|                  | 215 | 1,59 (9) · 10 <sup>-3</sup> с  | α                                                                                    | 8,699                                         | —                                                |
|                  | 216 | 1,82 (10) · 10 <sup>-7</sup> с | α                                                                                    | 9,349                                         | —                                                |
|                  | 217 | 1,6 (2) · 10 <sup>-6</sup> с   | α                                                                                    | 8,99                                          | —                                                |
|                  | 218 | 1,4 (2) · 10 <sup>-5</sup> с   | α                                                                                    | 8,39                                          | —                                                |
|                  | 219 | 0,01 (3) с                     | α                                                                                    | 7,98; 7,68                                    | —                                                |
|                  | 220 | 0,023 (5) с                    | α                                                                                    | 7,46 (99)                                     | 0,465 (1)                                        |
|                  | 221 | 28 (2) с                       | α                                                                                    | 6,76 (30); 6,67 (20);<br>6,61 (34); 6,59 (8)  | 0,091 (3,5); 0,151 (13); 0,175 (2)               |
|                  | 222 | 38,0 (5) с                     | α                                                                                    | 6,56 (96); 6,23                               | 0,325 (4)                                        |
|                  | 223 | 11,434 (2) сут                 | α                                                                                    | 5,75 (9); 5,71 (54);<br>5,61 (26); 5,54 (9)   | 0,149** (10); 0,270 (10);<br>0,33** (6)          |
|                  | 224 | 3,66 (4) сут                   | α                                                                                    | 5,68 (94); 5,45 (6)                           | 0,241 (3,7)                                      |
|                  | 225 | 14,8 (2) сут                   | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,36                                          | 0,040 (33)                                       |
|                  | 226 | 1600 (7) лет                   | α                                                                                    | 4,78 (95); 4,60 (6)                           | 0,186 (4)                                        |
|                  | 227 | 42,2 (5) мин                   | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,31                                          | 0,291 (4); 0,498 (0,6)                           |
|                  | 228 | 5,75 (3) года                  | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,04                                          | —                                                |
|                  | 229 | 4,0 (2) мин                    | β <sup>-</sup>                                                                       | 1,8                                           | —                                                |
|                  | 230 | 93 (2) мин                     | β <sup>-</sup>                                                                       | 0,8                                           | 0,063; 0,072; 0,203; 0,470                       |
| <sup>89</sup> Ac | 209 | 0,10 (5) с                     | α                                                                                    | 7,59                                          | —                                                |
|                  | 211 | 0,25 (5) с                     | α                                                                                    | 7,48                                          | —                                                |
|                  | 212 | 0,93 (5) с                     | α                                                                                    | 7,38                                          | —                                                |
|                  | 213 | 0,80 (5) с                     | α                                                                                    | 7,36                                          | —                                                |
|                  | 214 | 8,2 (2) с                      | α (≥ 86),<br>э. з. (< 14)                                                            | 7,214; 7,082                                  | —                                                |
|                  | 215 | 0,17 (1) с                     | α (99,91),<br>э. з. (0,09)                                                           | 7,604                                         | —                                                |
|                  | 216 | ~ 3,3 · 10 <sup>-4</sup> с     | α                                                                                    | 9,07; 8,99                                    | —                                                |
|                  | 217 | 1,11 (3) · 10 <sup>-7</sup> с  | α                                                                                    | 9,65                                          | —                                                |
|                  | 218 | 2,7 (4) · 10 <sup>-7</sup> с   | α                                                                                    | 9,21                                          | —                                                |
|                  | 219 | 7 (2) · 10 <sup>-6</sup> с     | α                                                                                    | 8,66                                          | —                                                |
|                  | 220 | 2,61 (5) · 10 <sup>-2</sup> с  | α                                                                                    | 7,85; 7,68; 7,61                              | 0,134                                            |
|                  | 221 | 0,052 (2) с                    | α                                                                                    | 7,65; 7,44; 7,38                              | —                                                |
|                  | 222 | 4,2 (5) с                      | α                                                                                    | 7,013 (93); 6,967                             | —                                                |
|                  | 223 | 2,2 (1) мин                    | α (~ 99)                                                                             | 6,66 (38); 6,65 (42);<br>6,57 (13)            | 0,082 (0,2); 0,096 (0,2)                         |
|                  | 224 | 2,9 (2) ч                      | α (~ 10)                                                                             | 6,20 (3); 6,14 (3);<br>6,04 (3)               | 0,132 (28); 0,217 (62)                           |
|                  | 225 | 10,0 (1) сут                   | э. з. (~ 90)                                                                         | 5,83 (54); 5,79 (28);<br>5,73* (10)           | 0,099; 0,150; 0,187                              |
|                  | 226 | 29 ч                           | α<br>β <sup>-</sup> (83)                                                             | 1,1; 0,9<br>5,34                              | 0,158 (32); 0,185 (9);<br>0,230 (47); 0,253 (11) |
|                  | 227 | 21,773 (3) года                | э. з. (17);<br>α (0,006)<br>β <sup>-</sup> (98,62)<br>α (1,38)                       | 0,046<br>4,95* (1,2); 4,86*<br>(0,18)         | 0,070; 0,166; 0,190                              |

| Элемент          | A   | Период полураспада               | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)                     |                                                                                                 |
|------------------|-----|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |     |                                  |                                                                         | групп частиц                                                      | γ-излучения                                                                                     |
| <sup>90</sup> Th | 228 | 6,13 ч                           | β <sup>-</sup>                                                          | 2,1; 1,2                                                          | 0,34** (15); 0,908 (25); 0,96** (20)                                                            |
|                  | 229 | 62,7 (5) мин                     | β <sup>-</sup>                                                          | 1,1                                                               | 0,14*; 0,16; 0,26; 0,57                                                                         |
|                  | 230 | 122 (3) с                        | β <sup>-</sup>                                                          | 2,7                                                               | 0,455; 0,508; 1,244                                                                             |
|                  | 231 | 7,5 (1) мин                      | β <sup>-</sup>                                                          | 2,1                                                               | 0,185; 0,28; 0,39; 0,71                                                                         |
|                  | 232 | 35 (5) с                         | β <sup>-</sup>                                                          | —                                                                 | —                                                                                               |
|                  | 213 | 0,150 (25) с                     | α                                                                       | 7,69                                                              | —                                                                                               |
|                  | 214 | 0,125 (25) с                     | α                                                                       | 7,68                                                              | —                                                                                               |
|                  | 215 | 1,2 (2) с                        | α                                                                       | 7,52; 7,39                                                        | —                                                                                               |
|                  | 216 | 0,028 (2) с                      | α                                                                       | 7,92                                                              | —                                                                                               |
|                  | 217 | 2,52 (7)·10 <sup>-4</sup> с      | α                                                                       | 9,25                                                              | —                                                                                               |
|                  | 218 | 1,09 (13)·10 <sup>-7</sup> с     | α                                                                       | 9,67                                                              | —                                                                                               |
|                  | 219 | 1,05 (3)·10 <sup>-6</sup> с      | α                                                                       | 9,34                                                              | —                                                                                               |
|                  | 220 | 9,7 (6)·10 <sup>-6</sup> с       | α                                                                       | 8,79                                                              | —                                                                                               |
|                  | 221 | 1,68 (6)·10 <sup>-6</sup> с      | α                                                                       | 8,47; 8,15                                                        | —                                                                                               |
|                  | 222 | 2,8 (3)·10 <sup>-6</sup> с       | α                                                                       | 7,98                                                              | —                                                                                               |
|                  | 223 | 0,66 (1) с                       | α                                                                       | 7,32; 7,29                                                        | —                                                                                               |
|                  | 224 | 1,04 (5) с                       | α                                                                       | 7,18 (79); 6,91 (19)                                              | 0,177 (9); 0,235 (0,4); 0,297 (0,3); 0,410 (0,8)                                                |
|                  | 225 | 8,0 (5) мин                      | α (~ 90)                                                                | 6,80 (8); 6,75 (6); 6,50 (12); 6,48 (39); 6,44 (13)               | 0,246 (5); 0,322 (27); 0,362 (5); 0,45 (1); 0,49 (1)                                            |
|                  | 226 | 30,9 мин                         | э. з. (~ 10)                                                            | —                                                                 | —                                                                                               |
|                  | 227 | 18,718 (5) сут                   | α                                                                       | 6,34 (79); 6,22 (19); 6,04 (23); 5,98 (24); 5,76 (21); 5,72* (14) | 0,111 (3,4); 0,242 (1,2); 0,050 (8); 0,237** (15); 0,31** (8)                                   |
|                  | 228 | 1,91313 (88) лет                 | α                                                                       | 5,42 (73); 5,34 (27)                                              | 0,084 (1,6); 0,132 (0,2); 0,167 (0,1); 0,214 (0,3); 0,239                                       |
|                  | 229 | 7340 (160) лет                   | α                                                                       | 5,05 (5); 4,97** (9); 4,90 (10); 4,84 (56); 4,81 (9)              | 0,137** (~ 3); 0,20* (~ 10)                                                                     |
|                  | 230 | 7,538 (30) × 10 <sup>4</sup> лет | α                                                                       | 4,69 (76); 4,62 (24)                                              | 0,068 (0,6); 0,142 (0,07)                                                                       |
|                  | 231 | 25,52 (1) ч                      | β <sup>-</sup>                                                          | 0,40; 0,30                                                        | 0,026 (2); 0,084** (10)                                                                         |
|                  | 232 | 14,05 (6)·10 <sup>9</sup> лет    | α                                                                       | 4,01 (77); 3,95 (23)                                              | —                                                                                               |
| <sup>91</sup> Pa | 233 | 22,3 (1) мин                     | β <sup>-</sup>                                                          | 1,23                                                              | 0,029 (2,1); 0,087 (2,7); 0,171 (0,7); 0,453 (1)                                                |
|                  | 234 | 24,10 (3) сут                    | β <sup>-</sup>                                                          | 0,191                                                             | 0,063* (3,5); 0,093* (4)                                                                        |
|                  | 235 | 6,9 (2) мин                      | β <sup>-</sup>                                                          | —                                                                 | 0,416—0,932                                                                                     |
|                  | 236 | 37,1 (15) мин                    | β <sup>-</sup>                                                          | 1,1; 1,0                                                          | 0,11                                                                                            |
|                  | 216 | 0,20 (4) с                       | α                                                                       | 7,87; 7,81                                                        | —                                                                                               |
|                  | 217 | 4,9 (6)·10 <sup>-3</sup> с       | α                                                                       | 8,33                                                              | —                                                                                               |
|                  | 222 | 5,7 (5)·10 <sup>-3</sup> с       | α                                                                       | 8,54; 8,33; 8,21                                                  | —                                                                                               |
|                  | 223 | 6,3 (10)·10 <sup>-3</sup> с      | α                                                                       | 8,20; 8,01                                                        | —                                                                                               |
|                  | 224 | 0,95 (15) с                      | α                                                                       | 7,49                                                              | —                                                                                               |
|                  | 225 | 1,8 (3) с                        | α                                                                       | 7,25; 7,20                                                        | —                                                                                               |
|                  | 226 | 1,8 (2) мин                      | α (74)                                                                  | 6,86 (38); 6,82 (34)                                              | —                                                                                               |
|                  | 227 | 38,3 (3) мин                     | э. з. (26)                                                              | —                                                                 | —                                                                                               |
|                  |     |                                  | α (~ 85)                                                                | 6,47 (43); 6,42** (23); 6,40 (8); 6,36 (7)                        | 0,065** (6); 0,110 (2)                                                                          |
|                  |     |                                  | э. з. (~ 15)                                                            | —                                                                 | —                                                                                               |
|                  | 228 | 22 (1) ч                         | э. з. (~ 98)                                                            | —                                                                 | 0,14 (3); 0,20 (9); 0,28 (5); 0,33 (18); 0,41 (13); 0,46 (32); 0,95 (93); 1,57 (7); 1,85 (4)*** |
|                  |     |                                  | α (~ 2)                                                                 | 6,11* (1); 6,08 (0,4); 6,03 (0,2); 5,80 (0,2)                     | —                                                                                               |
|                  | 229 | 1,4 (4) сут                      | э. з. (99,75)                                                           | —                                                                 | —                                                                                               |
|                  |     |                                  | α (0,25)                                                                | 5,67 (0,05); 5,62** (0,07); 5,58 (0,10); 5,54 (0,03)              | —                                                                                               |

| Элемент          | A    | Период полураспада                     | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)                                           |                                                                                                                    |
|------------------|------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                                        |                                                                         | групп частиц                                                                            | γ-излучения                                                                                                        |
| <sup>92</sup> U  | 230  | 17,4 (5) сут                           | э. з. (90)<br>β <sup>-</sup> (10)                                       | —                                                                                       | 0,45** (18); 0,91** (24);<br>0,95 (50)                                                                             |
|                  | 231  | 32760 (110) лет                        | α (0,0032)<br>α                                                         | 0,41<br>5,34; 5,32; 5,30<br>5,06 (11); 5,03 (20);<br>5,01 (25); 4,95 (23);<br>4,73 (11) |                                                                                                                    |
|                  | 232  | 1,31 (2) сут                           | β <sup>-</sup>                                                          | 1,3 (0,7); 0,32                                                                         | 0,150 (12); 0,87** (51); 0,97(40)<br>0,31** (44); 0,34                                                             |
|                  | 233  | 27,0 (1) сут                           | β <sup>-</sup>                                                          | 0,568 (5); 0,257                                                                        |                                                                                                                    |
|                  | 234  | 6,70 (5) ч                             | β <sup>-</sup>                                                          | 1,3 (< 2); 1,13 (13);<br>0,53                                                           | 0,100 (50); 0,126 (26);<br>0,70 (24); 0,90 (70)***                                                                 |
|                  | 234m | 1,17 (3) мин                           | β <sup>-</sup> (99,87)<br>и. п. (0,13)                                  | 2,29                                                                                    |                                                                                                                    |
|                  | 235  | 24,1 (2) мин                           | β <sup>-</sup>                                                          | —                                                                                       | 0,765 (0,30); 1,001 (0,60)<br>0,128—0,659                                                                          |
|                  | 236  | 9,1 (2) мин                            | β <sup>-</sup>                                                          | 1,4                                                                                     |                                                                                                                    |
|                  | 237  | 8,7 (2) мин                            | β <sup>-</sup>                                                          | 3,3                                                                                     | 0,64; 0,69; 1,76<br>0,090/50/; 0,145/45/;<br>0,205/55/; 0,330/40/;<br>0,46/100/; 0,75/50/;<br>0,87/100/; 0,92/100/ |
|                  | 237  | 8,7 (2) мин                            | β <sup>-</sup>                                                          | 2,3                                                                                     |                                                                                                                    |
|                  | 226  | 0,5 (2) с                              | α                                                                       | 7,43                                                                                    | —                                                                                                                  |
|                  | 227  | 1,1 (3) мин                            | α                                                                       | 6,87                                                                                    |                                                                                                                    |
|                  | 228  | 9,1 (2) мин                            | α (≥ 95)                                                                | 6,69/70/; 6,60/29/                                                                      | 0,152 (0,2); 0,187 (0,3);<br>0,246 (0,4)                                                                           |
|                  | 229  | 58 (3) мин                             | э. з. (~ 80)<br>α (~ 20)                                                | —                                                                                       |                                                                                                                    |
|                  | 230  | 20,8 сут                               | α                                                                       | 6,36 (13); 6,33 (4);<br>6,30 (3)<br>5,89 (67); 5,82 (32)                                | 0,072 (0,54); 0,231 (0,18)<br>0,084 (7); 0,218 (1)                                                                 |
|                  | 231  | 4,2 (1) сут                            | э. з. (> 99)<br>α (0,0055)                                              | —                                                                                       |                                                                                                                    |
|                  | 232  | 68,9 (4) года                          | α                                                                       | 5,46                                                                                    | 0,058 (0,21); 0,129 (0,082)                                                                                        |
|                  | 233  | 1,592 (2) ×<br>× 10 <sup>5</sup> лет   | с. д. (0,9·10 <sup>-10</sup> )<br>α                                     | 5,32 (69); 5,26 (31)                                                                    |                                                                                                                    |
|                  | 234  | 2,45 (2) ×<br>× 10 <sup>5</sup> лет    | с. д. (1,3·10 <sup>-10</sup> )<br>α                                     | 4,82 (84); 4,78 (13);<br>4,73 (1,5)                                                     | 0,029/60/; 0,042/310/;<br>0,055/68/; 0,097/100/;<br>0,164/27/; 0,32*/43/                                           |
|                  | 235  | 7,038 (5) ×<br>× 10 <sup>8</sup> лет   | с. д. (1,7·10 <sup>-9</sup> )<br>0,0055 (5)<br>0,7200 (12)<br>α         | —                                                                                       |                                                                                                                    |
|                  | 235m | 26,1 мин                               | с. д. (7,2·10 <sup>-9</sup> )<br>и. п.                                  | 4,77 (72); 4,72 (28)                                                                    | 0,053 (0,2)                                                                                                        |
|                  | 236  | 2,3416 (39) ×<br>× 10 <sup>7</sup> лет | α                                                                       | —                                                                                       |                                                                                                                    |
|                  | 237  | 6,75 (1) сут                           | с. д. (9,6·10 <sup>-8</sup> )<br>β <sup>-</sup>                         | —                                                                                       | 0,000076                                                                                                           |
|                  | 238  | 4,468 (3) ×<br>× 10 <sup>9</sup> лет   | 99,2745 (15)<br>α                                                       | 4,49 (74); 4,44 (26)                                                                    |                                                                                                                    |
|                  | 239  | 23,50 (5) мин                          | с. д. (5,4·10 <sup>-5</sup> )<br>β <sup>-</sup>                         | —                                                                                       | 0,026 (2); 0,060 (36);<br>0,165 (2); 0,208 (23)                                                                    |
|                  | 240  | 14,1 (2) ч                             | β <sup>-</sup>                                                          | 4,20 (77); 4,15 (23)                                                                    |                                                                                                                    |
| <sup>93</sup> Np | 227  | 1,1 (3) мин                            | α                                                                       | 1,29                                                                                    | 0,044 (4); 0,075 (51)<br>0,044                                                                                     |
|                  | 229  | 4,0 (2) мин                            | α                                                                       | 0,36                                                                                    |                                                                                                                    |
|                  | 230  | 4,6 (3) мин                            | α (> 99),<br>э. з. (< 0,97)                                             | 6,89                                                                                    | —                                                                                                                  |
|                  | 231  | 48,8 (2) мин                           | э. з. (< 99),<br>α (> 1)                                                | 6,66                                                                                    |                                                                                                                    |
|                  | 232  | 14,7 (3) мин                           | э. з.                                                                   | —                                                                                       | 0,264; 0,348; 0,371                                                                                                |
|                  | 233  | 36,2 (1) мин                           | э. з. (> 99),<br>α (~ 0,001)                                            | 6,29                                                                                    |                                                                                                                    |
|                  | 233  | 36,2 (1) мин                           | э. з. (> 99),<br>α (~ 0,001)                                            | 5,54                                                                                    | 0,28; 0,33; 0,82; 0,86**                                                                                           |

| Элемент          | A    | Период полураспада           | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                                                                        |
|------------------|------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |      |                              |                                                                         | групп частиц                                  | $\gamma$ -излучения                                                                    |
| <sup>94</sup> Pu | 234  | 4,4 (1) сут                  | $\beta^+$ з. ( $\sim 0,05$ )                                            | —                                             | } 0,109; 0,23; 0,25; 0,45; 0,50;<br>0,75; 0,95; 1,21; 1,56***                          |
|                  | 235  | 396,2 (12) сут               | $\beta^+$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0016)                            | 0,8<br>—<br>5,02; 5,00                        |                                                                                        |
|                  | 236  | 1,15 (12) $\times 10^5$ лет  | $\beta^-$ з. (91)                                                       | —                                             | } 0,104; 0,160                                                                         |
|                  | 237  | 2,14 (1) $\times 10^6$ лет   | $\beta^-$ (9)<br>$\alpha$                                               | —<br>4,79 (51); 4,77 (25);<br>4,65* (9)       |                                                                                        |
|                  | 238  | 2,117 (2) сут                | $\beta^-$                                                               | 1,25                                          | 1,01** (42)                                                                            |
|                  | 239  | 2,355 (4) сут                | $\beta^-$                                                               | 0,713 (11); 0,437                             | 0,106 (23); 0,209 (4);<br>0,228 (12); 0,278 (14)                                       |
|                  | 240  | 65 (3) мин                   | $\beta^-$                                                               | 0,89                                          | 0,16; 0,25; 0,44; 0,56; 0,60;<br>0,92; 1,00; 1,16                                      |
|                  | 240m | 7,4 (2) мин                  | $\beta^-$                                                               | 2,16                                          | 0,56 (21); 0,60 (13); 0,92** (3);<br>1,5** (3)                                         |
|                  | 241  | 16,0 (2) мин                 | $\beta^-$                                                               | 1,3                                           | 0,133; 0,174                                                                           |
|                  | 232  | 34,1 (7) мин                 | $\beta^-$ з. ( $\geq 80$ )<br>$\alpha$ ( $\leq 20$ )                    | —<br>6,59; 6,54                               | —                                                                                      |
|                  | 233  | 20,9 (4) мин                 | $\beta^-$ з. ( $\sim 100$ )<br>$\alpha$ (0,12)                          | —<br>6,31                                     | } 0,235; 0,535                                                                         |
|                  | 234  | 8,8 (1) ч                    | $\beta^-$ з. (94)<br>$\alpha$ (6)                                       | —<br>6,20 (4); 6,15 (1,9)                     |                                                                                        |
|                  | 235  | 25,3 (10) мин                | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,003)                             | —<br>5,86<br>5,77 (69); 5,72 (31)             | —<br>—<br>0,048 (0,31); 0,109 (0,012)                                                  |
|                  | 236  | 2,851 (8) года               | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>5,66/21; 5,37/79/                        | } 0,060 (5)                                                                            |
|                  | 237  | 45,3 (2) сут                 | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>5,66/21; 5,37/79/                        |                                                                                        |
|                  | 237m | 0,18 с                       | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>5,66/21; 5,37/79/                        | 0,145 (2)                                                                              |
|                  | 238  | 87,74 (4) года               | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>5,50 (72); 5,46 (28)                     | 0,099 ( $8 \cdot 10^{-3}$ ); 0,150 ( $1 \cdot 10^{-3}$ )                               |
|                  | 239  | 24119 (26) лет               | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>5,15* (88);<br>5,10 (11,5)               | —<br>0,039 (0,007); 0,052 (0,020);<br>0,129 (0,005); 0,375 (0,0012);<br>0,414 (0,0012) |
|                  | 240  | 6537 (10) лет                | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>5,17 (76); 5,12 (24)                     | —<br>0,65** ( $2 \cdot 10^{-5}$ )                                                      |
|                  | 241  | 14,4 (2) года                | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>4,90 (0,0019);<br>4,85 (0,0003)          | } 0,145 ( $1,6 \cdot 10^{-4}$ )                                                        |
|                  | 242  | 3,763 (20) $\times 10^5$ лет | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>0,021<br>4,90 (74); 4,86 (26)            |                                                                                        |
|                  | 243  | 4,956 (3) ч                  | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>0,58<br>4,59; 4,55                       | —<br>0,084 (21); 0,381 (0,7)                                                           |
|                  | 244  | 8,08 (10) $\times 10^7$ лет  | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>0,58<br>4,59; 4,55                       | —<br>—<br>—                                                                            |
| <sup>96</sup> Am | 245  | 10,5 (1) ч                   | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>1,2; 0,9<br>0,33 (10); 0,15              | —<br>0,33; 0,56<br>0,044 (30); 0,180 (10);<br>0,224 (25)                               |
|                  | 246  | 10,85 (2) сут                | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>1,2; 0,9<br>0,33 (10); 0,15              | —<br>0,33; 0,56<br>0,044 (30); 0,180 (10);<br>0,224 (25)                               |
|                  | 232  | 55 (7) с                     | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
|                  | 234  | 2,6 (2) мин                  | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
|                  | 237  | 73,0 (10) мин                | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
|                  | 238  | 98 (2) мин                   | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
|                  | 239  | 11,9 (1) ч                   | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
|                  | 240  | 50,8 (3) ч                   | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
|                  | 241  | 432,2 (5) года               | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |
|                  | 242  | —                            | $\beta^-$ з. ( $> 99$ )<br>$\alpha$ (0,0033)                            | —<br>—<br>—                                   | —<br>—<br>—                                                                            |

| Элемент          | A    | Период полураспада                  | Тип распада или относительная распространённость стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)                                    |                                                  |
|------------------|------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                  |      |                                     |                                                                         | групп частиц                                                                     | γ-излучения                                      |
| <sup>96</sup> Cm | 242  | 16,02 (2) ч                         | β <sup>-</sup> (82,7)                                                   | 0,67                                                                             | —                                                |
|                  | 242m | 152 (7) года                        | э. з. (17,3)<br>и. п. (99,52)                                           | —                                                                                | —                                                |
|                  |      |                                     | α (0,48)                                                                | 5,21 (0,41)                                                                      | } 0,049 (0,20); 0,087 (0,036)                    |
|                  | 243  | 7380 (40) лет                       | с. д. (1,6·10 <sup>-8</sup> )                                           | —                                                                                |                                                  |
|                  |      |                                     | α                                                                       | 5,28 (88); 5,23 (11)                                                             | 0,044 (4); 0,075 (50)                            |
|                  | 244  | 10,1 (1) ч                          | с. д. (2,2·10 <sup>-8</sup> )                                           | —                                                                                | 0,099 (5); 0,154 (19); 0,746 (66);<br>0,900 (25) |
|                  |      |                                     | β <sup>-</sup>                                                          | 0,387                                                                            |                                                  |
|                  | 244m | ~ 26 мин                            | β <sup>-</sup> (> 99)                                                   | 1,50                                                                             | —                                                |
|                  |      |                                     | э. з. (0,036)                                                           | —                                                                                | —                                                |
|                  | 245  | 2,05 (1) ч                          | β <sup>-</sup>                                                          | 0,91                                                                             | 0,253                                            |
|                  | 246  | 39 (3) мин                          | β <sup>-</sup>                                                          | 2,10 (7); 1,60                                                                   | 0,799 (29); 1,07** (65)                          |
|                  | 247  | 22 (3) мин                          | β <sup>-</sup>                                                          | —                                                                                |                                                  |
|                  | 238  | 2,4 (1) ч                           | э. з. (< 90)                                                            | —                                                                                | —                                                |
|                  |      |                                     | α (> 10)                                                                | 6,52                                                                             | —                                                |
|                  | 239  | ~ 2,9 ч                             | э. з.                                                                   | —                                                                                | 0,188                                            |
|                  | 240  | 27 (1) сут                          | α                                                                       | 6,29 (72); 6,25 (28)                                                             | —                                                |
|                  | 241  | 32,8 (2) сут                        | э. з. (99)                                                              |                                                                                  | } 0,475 (95); 0,60                               |
|                  |      |                                     | α (1)                                                                   | 5,94                                                                             |                                                  |
|                  | 242  | 162,8 (4) сут                       | α                                                                       | 6,11 (74); 6,07 (26)                                                             | 0,044 (0,041); 0,102 (4·10 <sup>-3</sup> )       |
|                  | 243  | 28,5 (2) года                       | с. д. (6,8·10 <sup>-9</sup> )                                           | —                                                                                | —                                                |
|                  |      |                                     | α (99,76)                                                               | 6,06* (6); 5,99* (6);<br>5,78 (73); 5,74 (11)                                    | } 0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)              |
|                  | 244  | 18,10 (2) года                      | э. з. (0,26)                                                            | —                                                                                |                                                  |
|                  |      |                                     | α                                                                       | 5,80 (77); 5,76 (23)                                                             | 0,043 (0,02); 0,100 (0,0015);<br>0,150 (0,0013)  |
|                  | 245  | 8500 (100) лет                      | с. д. (1,3·10 <sup>-4</sup> )                                           | —                                                                                | —                                                |
|                  | 246  | 4730 (100) лет                      | α                                                                       | 5,36 (91); 5,31 (6)                                                              | 0,13 (5); 0,173 (14)                             |
|                  |      |                                     | α                                                                       | 5,39 (79); 5,34 (21)                                                             |                                                  |
|                  | 247  | 1,56 (5) ×<br>× 10 <sup>7</sup> лет | с. д. (2,6·10 <sup>-2</sup> )                                           | —                                                                                | —                                                |
|                  |      |                                     | α                                                                       | 5,27; 4,87                                                                       | 0,278; 0,402                                     |
|                  | 248  | 3,40 (4) ×<br>× 10 <sup>6</sup> лет | α (91,74)                                                               | 5,08 (82); 5,04 (18)                                                             | —                                                |
| <sup>97</sup> Bk | 249  | 64,15 (3) мин                       | с. д. (8,26)                                                            | —                                                                                | —                                                |
|                  | 250  | ~ 7400 лет                          | β <sup>-</sup>                                                          | 0,9                                                                              | 0,634                                            |
|                  |      |                                     | с. д. (~ 65),<br>α (~ 28), β <sup>-</sup> (~ 7)                         | —                                                                                | —                                                |
|                  | 251  | 16,8 (2) мин                        | β <sup>-</sup>                                                          | 1,4                                                                              | 0,39; 0,44; 0,53; 0,54                           |
|                  | 242  | 7 мин                               | э. з.                                                                   | —                                                                                | —                                                |
|                  | 243  | 4,5 (2) ч                           | э. з. (99,85)                                                           | —                                                                                | —                                                |
|                  |      |                                     | α (0,15)                                                                | 6,76 (0,023);<br>6,72 (0,019);<br>6,57 (0,038);<br>6,54 (0,029);<br>6,21 (0,020) | } 0,755; 0,84; 0,946                             |
|                  |      |                                     |                                                                         | —                                                                                |                                                  |
|                  | 244  | 4,35 (15) ч                         | э. з. (> 99)                                                            | —                                                                                | } 0,218 (100); 0,892 (88)                        |
|                  |      |                                     | α (0,006)                                                               | 6,67 (0,003);<br>6,62 (0,003)                                                    |                                                  |
|                  | 245  | 4,94 (3) сут                        | э. з. (99,88)                                                           | —                                                                                | } 0,253 (31); 0,39* (3)                          |
|                  |      |                                     | α (0,12)                                                                | 6,36 (0,018);<br>6,32 (0,017);<br>6,15 (0,021);<br>6,12 (0,016);<br>5,89 (0,024) |                                                  |
|                  | 246  | 1,80 (2) сут                        | э. з.                                                                   | —                                                                                |                                                  |
|                  | 247  | 1380 (250) лет                      | α                                                                       | 5,69 (37); 5,53 (58)                                                             |                                                  |
|                  | 248  | 23,7 (2) ч                          | β <sup>-</sup> (70)                                                     | 0,9                                                                              |                                                  |
|                  |      |                                     | э. з. (30)                                                              | —                                                                                | } 0,551                                          |
|                  |      |                                     |                                                                         | —                                                                                |                                                  |
|                  |      |                                     |                                                                         | —                                                                                | 0,800 (40); 1,07** (12)<br>0,084 (40); 0,27 (30) |



| Элемент          | A    | Период полураспада | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                                         |
|------------------|------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                  |      |                    |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения                             |
| <sup>98</sup> Cf | 249  | 320 (6) сут        | β <sup>-</sup> (> 99)<br>α (0,0015)<br>с. д. (4,7·10 <sup>-8</sup> )    | 0,125<br>5,42 (0,0015); 5,39                  | } 0,32* (3·10 <sup>-5</sup> )           |
|                  | 250  | 3,217 (5) ч        | β <sup>-</sup>                                                          | 1,76 (11); 0,73                               | 0,990 (47); 1,032 (39)                  |
|                  | 251  | 56 (2) мин         | β <sup>-</sup>                                                          | ~ 1,0                                         | 0,153; 0,178                            |
|                  | 240  | 1,06 (15) мин      | α                                                                       | 7,59                                          | —                                       |
|                  | 241  | 3,78 (70) мин      | α                                                                       | 7,342                                         | —                                       |
|                  | 242  | 3,68 (44) мин      | э. з., α                                                                | 7,392; 7,358                                  | —                                       |
|                  | 243  | 10,7 (5) мин       | э. з. (~ 86)<br>α (~ 14)                                                | —<br>7,17; 7,06                               | —                                       |
|                  | 244  | 19,4 (6) мин       | α                                                                       | 7,213; 7,176                                  | —                                       |
|                  | 245  | 43,6 (8) мин       | э. з. (~ 70)<br>α (~ 30)                                                | —<br>7,137                                    | —                                       |
|                  | 246  | 35,7 (5) ч         | α                                                                       | 6,76 (78); 6,72 (22)                          | —                                       |
|                  | 247  | 3,11 (3) ч         | с. д.<br>э. з. (99,96)<br>α (0,04)                                      | —<br>—<br>6,301                               | } 0,295 (1); 0,417; 0,460               |
|                  | 248  | 333,5 (28) сут     | с. д.                                                                   | 6,27 (82); 6,22 (18)                          | —                                       |
|                  | 249  | 351 (2) год        | α                                                                       | 5,81 (84); 5,76 (4)                           | 0,333 (16); 0,388 (72)                  |
|                  | 250  | 13,08 (9) года     | с. д. (5,2·10 <sup>-7</sup> )<br>α                                      | —<br>6,03 (85); 5,99 (15)                     | —                                       |
|                  | 251  | 898 (44) лет       | с. д. (7,7·10 <sup>-2</sup> )<br>α                                      | —<br>5,85 (45); 5,67 (55)                     | 0,18; 0,23                              |
|                  | 252  | 2,638 (10) года    | α (96,91)<br>с. д. (3,09)                                               | 6,12 (84); 6,08 (16)<br>—                     | —                                       |
|                  | 253  | 17,81 (8) сут      | β <sup>-</sup> (99,69)<br>α (0,31)                                      | 0,27<br>5,98                                  | —                                       |
|                  | 254  | 60,5 (2) сут       | с. д. (99,69)<br>α (0,31)                                               | —<br>5,834                                    | —                                       |
|                  | 255  | 1,9 (6) ч          | β <sup>-</sup>                                                          | —                                             | —                                       |
|                  | 256  | 12,3 (12) мин      | с. д.                                                                   | —                                             | —                                       |
| <sup>98</sup> Es | 243  | 21 (2) с           | э. з., α                                                                | 7,89                                          | —                                       |
|                  | 244  | 37 (4) с           | э. з. (96), α (4)                                                       | 7,57                                          | —                                       |
|                  | 245  | 1,33 (15) мин      | э. з. (60)<br>α (40)                                                    | —<br>7,73                                     | —                                       |
|                  | 246  | 7,7 (5) мин        | э. з. (90)<br>α (10)                                                    | —<br>7,36                                     | —                                       |
|                  | 247  | 4,7 (3) мин        | э. з. (~ 93)<br>α (~ 7)                                                 | —<br>7,31                                     | —                                       |
|                  | 248  | 27 (3) мин         | э. з. (99,7)<br>α (0,3)                                                 | —<br>6,87                                     | —                                       |
|                  | 249  | 102,2 (6) мин      | э. з. (99,4)<br>α (0,6)                                                 | —<br>6,77                                     | } 0,38*; 0,81                           |
|                  | 250  | 8,6 (1) ч          | э. з.                                                                   | —                                             | 0,303; 0,349; 0,829                     |
|                  | 251  | 33 (1) ч           | э. з. (99,5)<br>α (0,5)                                                 | —<br>6,49; 6,46                               | } 0,178                                 |
|                  | 252  | 471,7 (19) сут     | α (78)<br>э. з. (22)                                                    | 6,64 (82); 6,58 (13)                          | } 0,228 (0,23); 0,278 (0,21);           |
|                  | 253  | 20,47 (3) сут      | с. д. (8,7·10 <sup>-6</sup> )<br>α                                      | —<br>6,63 (90)                                | } 0,40** (1,1)<br>0,387** (0,05)        |
|                  | 254  | 275,7 (5) сут      | α                                                                       | 6,43 (93)                                     | 0,063 (2); 0,27** (12);<br>0,31* (0,22) |
|                  | 254m | 39,3 (2) ч         | с. д.<br>β <sup>-</sup> (99,59)<br>α (0,33)                             | —<br>1,13 (25); 0,43<br>6,382                 | } 0,65 (31); 0,69** (38)                |
|                  | 255  | 39,8 (12) сут      | э. з. (0,08)<br>β <sup>-</sup> (92)<br>α (8)<br>с. д. (0,004)           | —<br>—<br>6,30; 6,26<br>—                     | —<br>—<br>—                             |

| Эле-<br>мент      | A    | Период полураспада | Тип распада или отно-<br>сительная распростра-<br>ненность стабильного<br>изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |                             |
|-------------------|------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|
|                   |      |                    |                                                                                      | групп частиц                                  | γ-излучения                 |
| <sup>100</sup> Fm | 256  | 7,6 ч              | β <sup>-</sup>                                                                       | —                                             | 0,22; 0,23; 0,86            |
|                   | 243  | 0,18 (6) с         | α                                                                                    | 8,55                                          | —                           |
|                   | 244  | 0,0037 (4) с       | с. д.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 245  | 4,2 (13) с         | α                                                                                    | 8,15                                          | —                           |
|                   | 246  | 1,1 (2) с          | α (92)                                                                               | 8,24                                          | —                           |
|                   |      |                    | с. д. (8)                                                                            | —                                             | —                           |
|                   | 247  | 35 (4) с           | α (> 50)                                                                             | 7,93; 7,87                                    | —                           |
|                   |      |                    | э. з. (< 50)                                                                         | —                                             | —                           |
|                   | 248  | 36 (3) с           | α (99,9)                                                                             | 7,87; 7,83                                    | —                           |
|                   |      |                    | с. д. (0,1)                                                                          | —                                             | —                           |
|                   | 249  | 2,6 (7) мин        | α                                                                                    | 7,53                                          | —                           |
|                   | 250  | 30 (3) мин         | α                                                                                    | 7,43                                          | —                           |
|                   | 251  | 5,30 (8) ч         | э. з. (98,2)                                                                         | —                                             | } 0,453; 0,881              |
|                   |      |                    | α (1,8)                                                                              | 6,83; 6,78                                    |                             |
|                   | 252  | 25,39 (5) ч        | с. д.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   |      |                    | α                                                                                    | 7,04; 7,00                                    | —                           |
|                   | 253  | 3,00 (12) сут      | э. з. (88)                                                                           | —                                             | } 0,145; 0,272              |
|                   |      |                    | α (12)                                                                               | 6,94 (9); 6,67 (2)                            |                             |
|                   | 254  | 3,240 (2) ч        | α (> 99)                                                                             | 7,20 (82); 7,16 (17)                          | —                           |
|                   |      |                    | с. д. (0,059)                                                                        | —                                             | —                           |
| <sup>101</sup> Md | 255  | 20,07 (7) ч        | α                                                                                    | 7,02 (93); 6,96                               | 0,059* (0,9); 0,081* (1; 1) |
|                   |      |                    | с. д.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 256  | 157,6 (13) мин     | с. д. (91,9)                                                                         | —                                             | —                           |
|                   |      |                    | α (8,1)                                                                              | 6,917                                         | —                           |
|                   | 257  | 100,5 (2) сут      | α (99,79)                                                                            | 6,52 (94)                                     | 0,180 (8); 0,242 (10)       |
|                   |      |                    | с. д. (0,21)                                                                         | —                                             | —                           |
|                   | 258  | 0,000380 (60) с    | с. д.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 259  | 1,5 (3) с          | с. д.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 248  | 7 (3) с            | э. з. (80), α (20)                                                                   | 8,36; 8,32                                    | —                           |
|                   | 249  | 24 (4) с           | э. з. (< 80),                                                                        | —                                             | —                           |
|                   |      |                    | α (> 20)                                                                             | 8,03                                          | —                           |
|                   | 250  | 52 (6) с           | э. з. (94), α (6)                                                                    | 7,82; 7,75                                    | —                           |
|                   | 251  | 4,0 (5) мин        | э. з. (> 90)                                                                         | —                                             | —                           |
|                   |      |                    | α (< 10)                                                                             | 7,55                                          | —                           |
|                   | 252  | 2,3 (8) мин        | э. з.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 254  | 10 (3) мин         | э. з.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 255  | 27 (2) мин         | э. з. (92)                                                                           | —                                             | } 0,430                     |
|                   |      |                    | α (8)                                                                                | 7,326                                         |                             |
|                   | 256  | 76 (4) мин         | э. з. (90,1)                                                                         | —                                             | } 0,400                     |
|                   |      |                    | α (9,9)                                                                              | 7,205; 7,138                                  |                             |
| <sup>102</sup> No | 257  | 5,2 (5) ч          | э. з. (90)                                                                           | —                                             | —                           |
|                   |      |                    | α (10)                                                                               | 7,063                                         | —                           |
|                   | 258  | 55 (4) сут         | α                                                                                    | 6,79; 6,72                                    | —                           |
|                   | 250  | 0,00025 (5) с      | α                                                                                    | —                                             | —                           |
|                   | 251  | 0,8 (3) с          | α                                                                                    | 8,68 (20);                                    | —                           |
|                   |      |                    |                                                                                      | 8,58 (80)                                     | —                           |
|                   | 252  | 2,30 (22) с        | α (73)                                                                               | 8,42; 8,37                                    | —                           |
|                   |      |                    | с. д. (27)                                                                           | —                                             | —                           |
|                   | 253  | 1,7 (3) мин        | α                                                                                    | 8,01                                          | —                           |
|                   | 254  | 55 (5) с           | α                                                                                    | 8,10                                          | —                           |
|                   | 254m | 0,28 с             | н. п.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 255  | 3,1 (2) мин        | α                                                                                    | 8,12; 8,08; 7,93                              | —                           |
|                   | 256  | 3,3 (2) с          | α (~ 99,7)                                                                           | 8,44; 8,40                                    | —                           |
|                   |      |                    | с. д. (0,3)                                                                          | —                                             | —                           |
|                   | 257  | 25 (2) с           | α                                                                                    | 8,27 (50); 8,22 (50)                          | —                           |
| <sup>103</sup> Lr | 258  | 0,0012 с           | с. д.                                                                                | —                                             | —                           |
|                   | 259  | 60 мин             | π (~ 78)                                                                             | 7,53; 7,50                                    | —                           |
|                   |      |                    | э. з. (~ 22)                                                                         | —                                             | —                           |
| <sup>103</sup> Lr | 255  | 22 (4) с           | α                                                                                    | 8,43; 8,37                                    | —                           |
|                   | 256  | 28 (3) с           | α                                                                                    | 8,52; 8,43; 8,39                              | —                           |

| Элемент           | A   | Период полураспада       | Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, % | Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %) |             |
|-------------------|-----|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|
|                   |     |                          |                                                                         | групп частиц                                  | γ-излучения |
| <sup>104</sup> Ku | 257 | 0,646 (25) с             | α                                                                       | 8,86; 8,80                                    | —           |
|                   | 258 | 4,3 (5) с                | α                                                                       | 8,65; 8,61; 8,59                              | —           |
|                   | 259 | 5,4 (8) с                | α                                                                       | 8,45                                          | —           |
|                   | 260 | 180 (30) с               | α                                                                       | 8,03                                          | —           |
|                   | 253 | ~ 1,8 с                  | с. д. (~ 50)                                                            | —                                             | —           |
|                   | 254 | 0,0005 (2) с             | с. д.                                                                   | —                                             | —           |
|                   | 256 | ~ 0,0005 с               | с. д.                                                                   | —                                             | —           |
|                   | 257 | 4,8 (3) с                | α                                                                       | 9,00; 8,95                                    | 0,127       |
|                   | 258 | 0,011 (2) с              | с. д.                                                                   | —                                             | —           |
|                   | 259 | 3,1 (7) с                | α                                                                       | 8,87; 8,77                                    | —           |
|                   | 260 | < 0,08 с                 | с. д.                                                                   | —                                             | —           |
| 105               | 261 | 65 (10) с                | α                                                                       | 8,28                                          | —           |
|                   | 255 | ~ 1,2 с?                 | с. д. (~ 20)                                                            | —                                             | —           |
|                   | 257 | 5,0 (12) с               | с. д. (~ 20), α                                                         | 9,16                                          | —           |
|                   | 260 | 1,52 (13) с              | α (90), с. д. (10)                                                      | 9,12; 9,07; 9,04                              | —           |
|                   | 261 | 1,8 (4) с                | α (~ 75), с. д. (~ 25)                                                  | 8,93                                          | —           |
| 106               | 262 | 34 (4) с                 | α (~ 40), с. д. (~ 60)                                                  | 8,66; 8,45                                    | —           |
|                   | 259 | 0,007 (3) с              | с. д. (~ 70), α (?)                                                     | —                                             | —           |
|                   | 263 | 0,8 (2) с                | α                                                                       | 9,25; 9,06                                    | —           |
| 107               | 261 | (1—2)·10 <sup>-3</sup> с | с. д. (~ 20), α                                                         | —                                             | —           |

В шестой колонке даны значения энергии (в мегаэлектрон-вольтах) основного γ-излучения, сопровождающего распад нуклида. В круглых скобках приведена интенсивность γ-излучения (в процентах), отнесенная к полному числу распадов. В косых скобках указана (в процентах) относительная интенсивность γ-излучения. Если после значения энергии скобки отсутствуют, это показывает, что интенсивность точно не определена. В ряде случаев приведен диапазон значений энергии γ-излучения. Символ 0,511 (ан.) означает, что γ-излучение имеет аннигиляционное происхождение. Одной, двумя и тремя звездочками отмечены дублет, сложная линия и случай, когда все линии сложные.

Более детальные сведения о типах распада и ядерной структуре нуклидов, содержащиеся в международном файле ENSDF, могут быть получены через Центр по атомным и ядерным данным (ЦАЯД) Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР.

### 37.2. ЭТАЛОННЫЕ ЭНЕРГИИ γ-ИЗЛУЧЕНИЯ, α-ЧАСТИЦ И КОНВЕРСИОННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В повседневной работе со спектрометрической аппаратурой полезны наборы эталонных значений энергии

излучения как с точки зрения интерпретации спектров излучений, так и для градуировки спектрометрической аппаратуры.

В табл. 37.2 представлены эталонные значения энергии γ-квантов [1, 2]. Значения  $E_\gamma$  охватывают диапазон энергий от 12 до 3500 кэВ и расположены в порядке возрастания энергии γ-квантов. Значения в скобках здесь и далее отвечают погрешности в младших разрядах значащих цифр.

В табл. 37.3 приведены энергии и абсолютные интенсивности γ-квантов [1, 2, 4] для некоторых нуклидов, испускающих один или несколько сильных γ-квантов и наиболее удобных для градуировки полупроводниковых спектрометров. В табл. 37.4 приведены значения наиболее интенсивных групп α-частиц в диапазоне энергий излучения от 2,5 до 7,7 МэВ [1, 2]. Значения  $E_\alpha$  расположены в порядке возрастания.

В табл. 37.5 собраны значения энергий и интенсивностей конверсионных электронов в диапазоне  $E_e$  от 25 до 2500 кэВ [2], полезные для интерпретации спектров конверсионных электронов и градуировки электронных спектрометров.

В табл. 37.6 для ряда нуклидов приведены мультипольности наиболее интенсивных γ-переходов и экспериментально определенные значения коэффициентов внутренней конверсии.

Таблица 37.2. Эталонные энергии  $\gamma$ -квантов  
в диапазоне энергий  $E_\gamma$  от 12 до 3500 кэВ [1,2]

Продолжение табл. 37.2

| Нуклид                                      | Период<br>полураспада | $E_\gamma$ , кэВ |
|---------------------------------------------|-----------------------|------------------|
| $^{241}\text{Am}(\text{NpL}_1)^{*1}$        | 432,2 года            | 11,890 (7)       |
| $^{57}\text{Co}$                            | 270,9 сут             | 14,41302 (32)    |
| $^{241}\text{Am}(\text{NpL}_2)^{*1}$        | 432,2 года            | 17,8 (1)         |
| $^{241}\text{Am}(\text{NpL}_3)^{*1}$        | 432,2 года            | 20,8 (1)         |
| $^{109}\text{Cd}(\text{Ag } K_\alpha)^{*1}$ | 464 сут               | 22,1 (1)         |
| $^{109}\text{Cd}(\text{Ag } K_\beta)^{*1}$  | 464 сут               | 25,0 (1)         |
| $^{241}\text{Am}$                           | 432,2 года            | 26,345 (5)       |
| $^{137}\text{Cs}(\text{Ba } K_\alpha)^{*1}$ | 30,0 лет              | 32,1 (1)         |
| $^{137}\text{Cs}(\text{Ba } K_\beta)^{*1}$  | 30,0 лет              | 36,4 (1)         |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 46,48502 (16)    |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 52,59648 (12)    |
| $^{133}\text{Ba}$                           | 10,5 года             | 53,156 (5)       |
| $^{241}\text{Am}$                           | 432,2 года            | 59,537 (1)       |
| $^{169}\text{Yb}$                           | 32,022 сут            | 63,12081 (4)     |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 65,72247 (14)    |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 67,74998 (12)    |
| $^{153}\text{Sm}$                           | 46,7 ч                | 69,67340 (10)    |
| $^{203}\text{Hg}(\text{Tl } K_\alpha)^{*1}$ | 46,6 сут              | 70,8319 (8)      |
| $^{203}\text{Hg}(\text{Tl } K_\beta)^{*1}$  | 46,6 сут              | 72,8715 (9)      |
| $^{153}\text{Sm}$                           | 46,7 ч                | 75,42257 (17)    |
| $^{106m}\text{Ag}$                          | 127 лет               | 79,14 (3)        |
| $^{133}\text{Ba}$                           | 10,5 года             | 80,999 (4)       |
| $^{153}\text{Sm}$                           | 46,7 ч                | 83,36765 (14)    |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 84,6823 (8)      |
| $^{106}\text{Cd}$                           | 464 сут               | 88,0341 (11)     |
| $^{153}\text{Sm}$                           | 46,7 ч                | 89,48646 (15)    |
| $^{169}\text{Yb}$                           | 32,022 сут            | 93,61497 (7)     |
| $^{153}\text{Sm}$                           | 46,7 ч                | 97,43155 (16)    |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 99,08182 (10)    |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 100,10652 (7)    |
| $^{153}\text{Sm}$                           | 46,7 ч                | 103,18072 (14)   |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 107,93369 (12)   |
| $^{169}\text{Yb}$                           | 32,022 сут            | 109,77988 (6)    |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 113,67244 (20)   |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 116,4201 (11)    |
| $^{169}\text{Yb}$                           | 32,022 сут            | 118,18996 (20)   |
| $^{152}\text{Eu}$                           | 13,33 года            | 121,7824 (3)     |
| $^{57}\text{Co}$                            | 270,9 сут             | 122,06135 (13)   |
| $^{169}\text{Yb}$                           | 32,022 сут            | 130,52365 (8)    |
| $^{192}\text{Ir}$                           | 73,83 сут             | 136,34304 (49)   |
| $^{57}\text{Co}$                            | 270,9 сут             | 136,47434 (30)   |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 144,12536 (29)   |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 152,43058 (24)   |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 156,38740 (29)   |
| $^{199}\text{Au}$                           | 3,139 сут             | 158,37945 (10)   |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 160,53005 (48)   |
| $^{132}\text{Ba}$                           | 10,5 года             | 160,609 (25)     |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 161,34799 (9)    |
| $^{183}\text{Ta}$                           | 5,1 сут               | 162,32522 (28)   |
| $^{153}\text{Sm}$                           | 46,7 ч                | 172,85407 (15)   |
| $^{169}\text{Yb}$                           | 32,022 сут            | 177,21417 (9)    |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 179,39486 (24)   |
| $^{169}\text{Yb}$                           | 32,022 сут            | 197,95792 (9)    |
| $^{182}\text{Ta}$                           | 115 сут               | 198,35302 (27)   |
| $^{192}\text{Ir}$                           | 73,83 сут             | 205,79549 (68)   |
| $^{199}\text{Au}$                           | 3,139 сут             | 208,20595 (12)   |

| Нуклид                 | Период<br>полураспада | $E_\gamma$ , кэВ |
|------------------------|-----------------------|------------------|
| $^{183}\text{Ta}$      | 5,1 сут               | 209,87220 (45)   |
| $^{182}\text{Ta}$      | 115 сут               | 222,10980 (30)   |
| $^{133}\text{Ba}$      | 10,5 года             | 223,116 (35)     |
| $^{182}\text{Ta}$      | 115 сут               | 229,32197 (64)   |
| $^{228}\text{Th}$      | 1,913 года            | 238,632 (2)      |
| $^{183}\text{Ta}$      | 5,1 сут               | 244,26913 (55)   |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 244,692 (2)      |
| $^{183}\text{Ta}$      | 5,1 сут               | 246,06473 (23)   |
| $^{169}\text{Yb}$      | 32,022 сут            | 261,07865 (12)   |
| $^{182}\text{Ta}$      | 115 сут               | 264,07542 (30)   |
| $^{133}\text{Ba}$      | 10,5 года             | 276,404 (7)      |
| $^{203}\text{Hg}$      | 46,6 сут              | 279,1968 (10)    |
| $^{183}\text{Ta}$      | 5,1 сут               | 291,73096 (68)   |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 295,939 (8)      |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 295,95825 (13)   |
| $^{133}\text{Ba}$      | 10,5 года             | 302,858 (5)      |
| $^{169}\text{Yb}$      | 32,022 сут            | 307,73766 (13)   |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 308,45689 (15)   |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 316,50789 (18)   |
| $^{51}\text{Cr}$       | 27,7 сут              | 320,08419 (42)   |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 344,275 (4)      |
| $^{183}\text{Ta}$      | 5,1 сут               | 353,99767 (36)   |
| $^{133}\text{Ba}$      | 10,5 года             | 356,014 (9)      |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 367,789 (5)      |
| $^{133}\text{Ba}$      | 10,5 года             | 383,859 (9)      |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 411,115 (5)      |
| $^{198}\text{Au}$      | 2,696 сут             | 411,80441 (15)   |
| $^{108m}\text{Ag}$     | 127 лет               | 433,939 (4)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 446,812 (4)      |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 468,07147 (27)   |
| $^{134}\text{Cs}$      | 2,062 года            | 475,36 (5)       |
| $^7\text{Be}$          | 53,44 сут             | 477,605 (3)      |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 484,57797 (41)   |
| $m_0c^2$ <sup>*2</sup> | —                     | 511,006 (2)      |
| $^{134}\text{Cs}$      | 2,062 года            | 563,27 (5)       |
| $^{134}\text{Cs}$      | 2,062 года            | 569,30 (3)       |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 586,294 (6)      |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 588,58446 (72)   |
| $^{124}\text{Sb}$      | 60,2 сут              | 602,728 (12)     |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 604,41415 (47)   |
| $^{134}\text{Cs}$      | 2,062 года            | 604,68 (2)       |
| $^{192}\text{Ir}$      | 73,83 сут             | 612,46504 (78)   |
| $^{108m}\text{Ag}$     | 127 лет               | 614,281 (6)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 620,358 (3)      |
| $^{124}\text{Sb}$      | 60,2 сут              | 645,858 (12)     |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 657,761 (2)      |
| $^{137}\text{Cs}$      | 30,0 лет              | 661,661 (3)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 677,627 (4)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 687,010 (4)      |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 688,678 (6)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 706,680 (5)      |
| $^{124}\text{Sb}$      | 60,2 сут              | 709,320 (13)     |
| $^{124}\text{Sb}$      | 60,2 сут              | 713,793 (13)     |
| $^{124}\text{Sb}$      | 60,2 сут              | 722,789 (16)     |
| $^{108m}\text{Ag}$     | 127 лет               | 722,938 (8)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 744,279 (5)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 763,949 (5)      |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 778,903 (6)      |
| $^{124}\text{Sb}$      | 60,2 сут              | 790,727 (16)     |
| $^{134}\text{Cs}$      | 2,062 года            | 795,78 (2)       |
| $^{134}\text{Cs}$      | 2,062 года            | 801,86 (3)       |
| $^{152}\text{Eu}$      | 13,33 года            | 810,459 (7)      |
| $^{110m}\text{Ag}$     | 249,8 сут             | 818,032 (5)      |
| $^{54}\text{Mn}$       | 312,5 сут             | 834,848 (17)     |

\*1 Интенсивные рентгеновские переходы, возникающие при распаде ядер.

\*2 Энергия аннигиляционного излучения, сопровождающего позитронный распад нуклидов.

| Нуклид             | Период<br>полураспада | $E_{\gamma}$ , кэВ |
|--------------------|-----------------------|--------------------|
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 841,586 (8)        |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 846,772 (13)       |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 867,388 (8)        |
| $^{192}\text{Ir}$  | 73,83 сут             | 884,54174 (74)     |
| $^{110m}\text{Ag}$ | 249,8 сут             | 884,684 (5)        |
| $^{46}\text{Sc}$   | 83,83 сут             | 889,277 (3)        |
| $^{88}\text{Y}$    | 106,6 сут             | 898,042 (4)        |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 919,401 (8)        |
| $^{110m}\text{Ag}$ | 249,8 сут             | 937,491 (5)        |
| $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 сут              | 968,208 (17)       |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1005,279 (17)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 1037,840 (15)      |
| $^{134}\text{Cs}$  | 2,062 года            | 1038,53 (5)        |
| $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 сут              | 1045,138 (20)      |
| $^{207}\text{Bi}$  | 38 лет                | 1063,662 (4)       |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1085,914 (13)      |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1089,700 (15)      |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1112,116 (17)      |
| $^{65}\text{Zn}$   | 244,1 сут             | 1115,546 (4)       |
| $^{46}\text{Sc}$   | 83,83 сут             | 1120,545 (4)       |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1121,299 (14)      |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1157,505 (15)      |
| $^{134}\text{Cs}$  | 2,062 года            | 1167,89 (6)        |
| $^{60}\text{Co}$   | 5,271 года            | 1173,238 (4)       |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 1175,102 (16)      |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1189,051 (14)      |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1212,950 (12)      |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1221,406 (16)      |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1231,019 (16)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 1238,282 (17)      |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1257,421 (16)      |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1273,735 (16)      |
| $^{22}\text{Na}$   | 2,602 года            | 1274,542 (7)       |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1289,158 (16)      |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1299,124 (12)      |
| $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 сут              | 1325,516 (21)      |
| $^{60}\text{Co}$   | 5,271 года            | 1332,501 (5)       |
| $^{132}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1342,731 (25)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 1360,25 (7)        |
| $^{134}\text{Cs}$  | 2,062 года            | 1365,17 (10)       |
| $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 сут              | 1368,179 (30)      |
| $^{24}\text{Na}$   | 15,02 ч               | 1368,633 (6)       |
| $^{182}\text{Ta}$  | 115 сут               | 1373,838 (24)      |
| $^{110m}\text{Ag}$ | 249,8 сут             | 1384,300 (4)       |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1408,011 (14)      |
| $^{152}\text{Eu}$  | 13,33 года            | 1457,628 (15)      |
| $^{110m}\text{Ag}$ | 249,8 сут             | 1475,786 (5)       |
| $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 сут              | 1488,886 (24)      |
| $^{110m}\text{Ag}$ | 249,8 сут             | 1505,036 (5)       |
| $^{110m}\text{Ag}$ | 249,8 сут             | 1562,301 (6)       |
| $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 сут              | 1690,992 (26)      |
| $^{207}\text{Bi}$  | 38 лет                | 1770,237 (10)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 1771,351 (26)      |
| $^{88}\text{Y}$    | 106,6 сут             | 1836,063 (13)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 2015,181 (28)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 2034,755 (29)      |
| $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 сут              | 2090,962 (35)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 2598,458 (33)      |
| $^{88}\text{Y}$    | 106,6 сут             | 2734,087 (30)      |
| $^{24}\text{Na}$   | 15,02 ч               | 2754,030 (14)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 3201,962 (46)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 3253,416 (45)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 3272,990 (45)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 3451,152 (47)      |
| $^{56}\text{Co}$   | 78,76 сут             | 3547,925 (61)      |

Таблица 37.3. Энергии и абсолютные интенсивности  $\gamma$ -квантов для некоторых источников, удобных для градуировки детекторов [1, 2, 4]

| Нуклид            | $E_{\gamma}$ , кэВ | $I_{\gamma}$ ,<br>%/расп. | Нуклид            | $E_{\gamma}$ , кэВ | $I_{\gamma}$ ,<br>%/расп. |
|-------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|
| $^{241}\text{Am}$ | 26,345 (5)         | 2,47(7)                   | $^{198}\text{Au}$ | 411,80441 (15)     | 95,47(8)                  |
|                   | 59,537 (1)         | 36,5(2)                   | $^{137}\text{Cs}$ | 661,661 (3)        | 85,4(8)                   |
| $^{109}\text{Cd}$ | 88,0341 (11)       | 3,75(7)                   | $^{54}\text{Mn}$  | 834,848 (17)       | 99,978(2)                 |
| $^{57}\text{Co}$  | 14,41302 (32)      | 9,6(3)                    | $^{60}\text{Co}$  | 1173,238 (4)       | 99,87(6)                  |
|                   | 122,06135 (13)     | 85,6 (4)                  |                   | 1332,501 (5)       | 99,980(9)                 |
|                   | 136,47434 (30)     | 11,1(3)                   | $^{22}\text{Na}$  | 1274,542 (7)       | 99,95(3)                  |
| $^{199}\text{Au}$ | 158,37945 (10)     | 100*                      | $^{88}\text{Y}$   | 898,042 (4)        | 93,4(7)                   |
|                   | 208,20595 (12)     | 22,1(3)*                  |                   | 1836,063 (13)      | 99,37(2)                  |
| $^{203}\text{Hg}$ | 279,1968 (10)      | 81,4(2)                   |                   | 2734,087 (30)      | 0,72(7)                   |
| $^{51}\text{Cr}$  | 320,08419 (42)     | 9,83(10)                  | $^{24}\text{Na}$  | 1368,633 (6)       | 99,994(2)                 |
|                   |                    |                           |                   | 2754,030 (14)      | 99,87(2)                  |

\* Относительная интенсивность  $\gamma$ -квантов, %.Таблица 37.4. Эталонные группы  $\alpha$ -частиц в диапазоне энергий  $E_{\alpha}$  от 2,5 до 7,7 МэВ [1, 2]

| Нуклид                | Период<br>полураспада  | $E_{\alpha}$ , МэВ | Относительная<br>интенсивность, % |
|-----------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| $^{146}\text{Sm}$     | $1,03 \cdot 10^8$ лет  | 2,470 (6)          | 100                               |
| $^{150}\text{Gd}$     | $1,79 \cdot 10^8$ лет  | 2,719 (8)          | 100                               |
| $^{148}\text{Gd}$     | 93 года                | 3,182787 (24)      | 100                               |
| $^{232}\text{Th}$     | $14,05 \cdot 10^9$ лет | 4,012 (5)          | 77                                |
|                       |                        | 3,953 (8)          | 23                                |
| $^{238}\text{U}$      | $4,468 \cdot 10^9$ лет | 4,196 (4)          | 77                                |
|                       |                        | 4,149 (5)          | 23                                |
| $^{235}\text{U}$      | $7,038 \cdot 10^8$ лет | 4,400 (2)          | 62                                |
|                       |                        | 4,368 (3)          | 18                                |
|                       |                        | 4,219 (2)          | 5,7                               |
| $^{239}\text{U}$      | $2,34 \cdot 10^7$ лет  | 4,494 (3)          | 74                                |
|                       |                        | 4,445 (5)          | 26                                |
| $^{230}\text{Th}$     | $7,54 \cdot 10^4$ лет  | 4,6875 (15)        | 76,3                              |
|                       |                        | 4,6210 (15)        | 23,4                              |
| $^{234}\text{U}$      | $2,45 \cdot 10^5$ лет  | 4,7739 (9)         | 72                                |
|                       |                        | 4,7220 (9)         | 28                                |
| $^{237}\text{Np}$ [3] | $2,14 \cdot 10^6$ лет  | 4,787 (2)          | 51                                |
| $^{233}\text{U}$ [3]  | $1,59 \cdot 10^5$ лет  | 4,8236 (12)        | 84                                |
| $^{241}\text{Pu}$ [3] | 14,4 года              | 4,8960 (15)        | 83                                |
|                       |                        | 4,8530 (15)        | 12                                |
| $^{242}\text{Pu}$ [3] | $3,76 \cdot 10^5$ лет  | 4,900 (2)          | 74                                |
|                       |                        | 4,856 (2)          | 26                                |
| $^{231}\text{Pa}$     | 32 760 лет             | 5,0590 (8)         | 11                                |
|                       |                        | 5,0297 (8)         | <20                               |
|                       |                        | 5,0141 (8)         | 25,4                              |
|                       |                        | 4,9517 (8)         | 22,8                              |

| Нуклид                | Период<br>полураспада | $E_\alpha$ , МэВ                       | Относительная<br>интенсивность, % |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| $^{239}\text{Pu}$     | 24 119 лет            | 5,1554 (7)<br>5,1429 (8)<br>5,1046 (8) | 73<br>15,1<br>11,5                |
| $^{240}\text{Pu}$ [3] | 6537 лет              | 5,1677 (7)<br>5,1233 (7)               | 76<br>24                          |
| $^{243}\text{Am}$     | 7380 лет              | 5,2754 (10)<br>5,2335 (10)             | 88<br>10,6                        |
| $^{210}\text{Po}$     | 138,38 сут            | 5,30451 (7)                            | 100                               |
| $^{241}\text{Am}$     | 432,2 года            | 5,48560 (12)<br>5,44298 (13)           | 85,2<br>12,8                      |
| $^{238}\text{Pu}$     | 87,74 года            | 5,49921 (20)<br>5,4565 (4)             | 72<br>28                          |
| $^{244}\text{Cm}$     | 18,1 года             | 5,80496 (5)<br>5,762835 (30)           | 76,7<br>23,3                      |
| $^{243}\text{Cm}$     | 28,5 года             | 5,7847 (9)<br>5,7415 (9)               | 73<br>11                          |
| $^{250}\text{Cf}$ [3] | 13,08 года            | 6,0308 (6)<br>5,9891 (6)               | 85<br>15                          |
| $^{242}\text{Cm}$ [3] | 162,8 сут             | 6,1129 (3)<br>6,0695 (5)               | 74<br>26                          |
| $^{252}\text{Cf}$ [3] | 2,638 года            | 6,1183 (5)<br>6,0757 (5)               | 84<br>16                          |
| $^{249}\text{Cf}$ [3] | 351 год               | 6,1940 (7)<br>5,813 (1)<br>5,760 (1)   | 2<br>84<br>4                      |
| $^{254}\text{Es}$     | 275,7 сут             | 6,4288 (15)                            | 93                                |
| $^{253}\text{Es}$     | 20,47 сут             | 6,63273 (5)<br>6,5916 (2)              | 89,8<br>6,6                       |
| $^{255}\text{Fm}$ [3] | 20,07 ч               | 7,016 (2)                              | 93                                |

Таблица 37.5. Эталонные энергии конверсионных электронов в диапазоне энергий  $E_e$  от 25 до 2500 кэВ [2]

| Нуклид             | Период<br>полураспада | $E_e$ , кэВ                                                                    | Интенсивность<br>конверсионных<br>электронов,<br>%/расп.      |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $^{199}\text{Au}$  | 3,139 сут             | 34,986 (7)<br>75,273 (7)<br>125,099 (7)<br>143,536 (7)                         | 2,92 (14)<br>10,9 (5)<br>6,4 (3)<br>17,0 (8)                  |
| $^{203}\text{Hg}$  | 46,6 сут              | 154,813 (7)<br>193,659 (5)<br>263,842 (5)<br>275,485 (5)                       | 4,38 (19)<br>16,9 (8)<br>4,35 (13)<br>1,06 (3)                |
| $^{196}\text{Au}$  | 2,696 сут             | 328,7021 (9)<br>396,9651 (11)                                                  | 2,87 (9)<br>1,02 (3)                                          |
| $^{192}\text{Ir}$  | 73,831 сут            | 217,5634 (8)<br>230,0621 (8)<br>238,1131 (8)<br>302,6280 (5)<br>389,6767 (8)   | 1,924 (14)<br>1,790 (25)<br>4,47 (14)<br>1,95 (6)<br>1,02 (4) |
| $^{207}\text{Bi}$  | 38 лет                | 481,665 (20)<br>553,809 (20)<br>975,615 (20)<br>1047,759 (20)<br>1059,769 (20) | 1,55 (5)<br>0,435 (13)<br>7,04 (23)<br>1,78 (6)<br>0,587 (8)  |
| $^{137}\text{Cs}$  | 30,0 лет              | 624,208 (5)                                                                    | 7,64 (55)                                                     |
| $^{137m}\text{Ba}$ | 2,55 мин              | 655,660 (5)                                                                    | 1,38 (50)                                                     |
| $^{60}\text{Co}$   | 5,271 года            | 1164,906 (4)<br>1324,170 (5)                                                   | ~0,015<br>~0,011                                              |

| Нуклид            | Период<br>полураспада | $E_e$ , кэВ                                | Интенсивность<br>конверсионных<br>электронов,<br>%/расп. |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| $^{212}\text{Bi}$ | 60,55 мин             | 24,510 (5)                                 | —                                                        |
| $^{212}\text{Pb}$ | 10,64 ч               | 36,153 (5)                                 | —                                                        |
| $^{208}\text{Tl}$ | 3,07 мин              | 148,099 (6)<br>222,238 (6)<br>2526,66 (10) | —<br>—<br>—                                              |

Таблица 37.6. Эталонные значения коэффициентов внутренней конверсии [1]

| Нуклид            | Период<br>полураспада | $E_\gamma$ , кэВ | Мультиполь-<br>ность<br>перехода | Коэффициент<br>внутренней<br>конверсии $I_e/I_\gamma$ |
|-------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| $^{109}\text{Gd}$ | 464 сут               | 88,0             | $E3$                             | 11,2 (2)                                              |
| $^{141}\text{Ce}$ | 32,50 сут             | 145,4            | $M1+0,4\% E2$                    | 0,378 (4)                                             |
| $^{139}\text{Ce}$ | 137,66 сут            | 165,9            | $M1$                             | 0,2152 (33)                                           |
| $^{108}\text{Hg}$ | 46,60 сут             | 279,2            | $E2+41\% M1$                     | 0,164 (2)                                             |
| $^{118}\text{Sn}$ | 115,09 сут            | 391,7            | $M4$                             | 0,438 (6)                                             |
| $^{198}\text{Au}$ | 2,696 сут             | 411,8            | $E2$                             | 0,0302 (3)                                            |
| $^{137}\text{Cs}$ | 30,0 лет              | 661,7            | $M4$                             | 0,0916 (5)                                            |
| $^{58}\text{Co}$  | 70,78 сут             | 810,8            | $E2$                             | 0,000295 (10)                                         |
| $^{54}\text{Mn}$  | 312,5 сут             | 834,8            | $E2$                             | 0,000224 (10)                                         |
| $^{65}\text{Zn}$  | 244,1 сут             | 1115,5           | $M1+16\% E2$                     | 0,0001664 (66)                                        |

## 37.3. КВАНТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР

В табл. 37.7 приведены экспериментально определенные значения спинов  $I$  магнитных моментов  $\mu$  и электрических квадрупольных моментов  $Q$  основных и некоторых долгоживущих метастабильных состояний для четно-нечетных, нечетно-четных и нечетно-нечетных ядер. В таблицу не включены четно-четные ядра, у которых значения спинов и магнитных моментов основных состояний равны нулю. Значения  $I$ ,  $\mu$  и  $Q$  даны в единицах  $\hbar$  ( $\hbar = h/2\pi$ , где  $h$  — постоянная Планка), в ядерных магнетонах  $\mu_n$  и фемтометрах соответственно. Значения спинов, указанные в круглых скобках, получены косвенным путем.

Таблица 37.7. Спины, магнитные моменты  
и электрические квадрупольные моменты ядер [1]

Продолжение табл. 37.7

| Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_N$    | $Q, \text{фм}^2$ | Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_N$   | $Q, \text{фм}^2$ |
|------------------|-----------------------|------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------------|------------|----------------|------------------|
| $^1\text{H}$     | 1                     | 1/2        | +2,7928456 (11) | —                | $^{20}\text{Ca}$ | 39                    | 3/2        | 1,02168 (12)   | —                |
|                  | 2                     | 1          | +0,8574376 (4)  | +0,2875 (20)     |                  | 41                    | 7/2        | -1,594780 (9)  | —                |
| $^3\text{He}$    | 3                     | 1/2        | +2,978960 (1)   | —                | $^{21}\text{Sc}$ | 43                    | 7/2        | -1,31726 (60)  | <23              |
| $^3\text{Li}$    | 3                     | 1/2        | -2,127624 (1)   | —                |                  | 41                    | 7/2        | 5,43 (2)       | —                |
|                  | 6                     | 1          | +0,8220467 (6)  | -0,0644 (7)      |                  | 43                    | 7/2        | +4,64 (4)      | -26 (6)          |
| $^4\text{Be}$    | 7                     | 3/2        | +3,256424 (2)   | -3,66 (3)        |                  | 44                    | 2          | +2,56 (3)      | +10 (5)          |
| $^5\text{B}$     | 8                     | 2          | +1,6532 (8)     | 2,4 (2)          |                  | 44 $m$                | 6          | +3,88          | -19 (2)          |
|                  | 9                     | 3/2        | -1,778 (9)      | +5,3 (3)         |                  | 45                    | 7/2        | 4,756483 (3)   | -22 (1)          |
|                  | 8                     | 2          | 1,0355 (3)      | —                |                  | 46                    | 4          | +3,03 (2)      | +11,9 (6)        |
|                  | 10                    | 3          | +1,80065 (1)    | +8,472 (56)      |                  | 47                    | 7/2        | +5,34 (2)      | -22 (3)          |
|                  | 11                    | 3/2        | +2,688637 (2)   | +4,196           | $^{22}\text{Ti}$ | 48                    | 6          | —              | —                |
|                  | 12                    | 1          | +1,00306 (15)   | 1,71 (16)        |                  | 45                    | 7/2        | 0,095 (2)      | 1,5 (15)         |
| $^{12}\text{C}$  | 13                    | 3/2        | +3,17778 (51)   | 4,78 (46)        |                  | 47                    | 5/2        | -0,78848 (1)   | +29 (1)          |
| $^{13}\text{C}$  | 11                    | 3/2        | 1,027 (10)      | 3,08 (6)         |                  | 49                    | 7/2        | -1,10417 (1)   | +24 (1)          |
| $^{14}\text{N}$  | 13                    | 1/2        | +0,702411 (1)   | —                | $^{23}\text{V}$  | 47                    | 3/2        | —              | —                |
|                  | 12                    | 1          | +0,4573 (5)     | —                |                  | 48                    | 4          | 1,63 (10)      | —                |
|                  | 13                    | 1/2        | 0,32224 (35)    | —                |                  | 49                    | 7/2        | 4,47 (5)       | —                |
|                  | 14                    | 1          | +0,4037607 (2)  | +1,56            |                  | 50                    | 6          | +3,34745 (3)   | 7                |
| $^{16}\text{O}$  | 15                    | 1/2        | -0,2831892 (3)  | —                | $^{24}\text{Cr}$ | 51                    | 7/2        | +5,1514 (1)    | -5,2 (10)        |
|                  | 15                    | 1/2        | 0,7189 (8)      | —                |                  | 49                    | 5/2        | 0,476 (3)      | —                |
| $^{17}\text{O}$  | 17                    | 5/2        | -1,89379 (9)    | -2,6 (3)         |                  | 51                    | 7/2        | (-)0,934 (5)   | —                |
| $^{18}\text{F}$  | 17                    | 5/2        | +4,7223 (12)    | 10 (2)           | $^{25}\text{Mn}$ | 53                    | 3/2        | -0,47454 (3)   | 2,2              |
|                  | 19                    | 1/2        | +2,628866 (8)   | —                |                  | 51                    | 5/2        | 3,568 (2)      | 50 (10)          |
| $^{20}\text{Ne}$ | 20                    | 2          | +2,0935 (9)     | 7,0 (13)         |                  | 52                    | 6          | +3,0621 (14)   | +60 (8)          |
|                  | 19                    | 1/2        | -1,887 (1)      | —                |                  | 52 $m$                | 2          | 0,0076         | —                |
|                  | 21                    | 3/2        | -0,661796 (5)   | +10,29 (75)      |                  | 53                    | 7/2        | 5,024 (7)      | —                |
| $^{23}\text{Na}$ | 23                    | 5/2        | -1,08 (1)       | —                |                  | 54                    | 3          | +3,2818 (13)   | —                |
|                  | 20                    | 2          | +0,3694 (2)     | —                |                  | 55                    | 5/2        | +3,468716 (2)  | +35 (5)          |
| $^{21}\text{Na}$ | 21                    | 3/2        | +2,38629 (10)   | -6,0 (75)        | $^{26}\text{Fe}$ | 56                    | 3          | +3,2266 (2)    | —                |
|                  | 22                    | 3          | +1,746 (3)      | —                |                  | 57                    | 1/2        | +0,09044 (7)   | —                |
|                  | 23                    | 3/2        | +2,217520 (2)   | +10,1 (8)        |                  | 59                    | 3/2        | 0,29 (3)       | —                |
|                  | 24                    | 4          | +1,6903 (8)     | —                | $^{27}\text{Co}$ | 55                    | 7/2        | +4,822 (3)     | —                |
|                  | 25                    | 5/2        | +3,683 (4)      | +23 (8)          |                  | 56                    | 4          | 3,830 (15)     | —                |
| $^{25}\text{Mg}$ | 25                    | 5/2        | -0,85545 (8)    | +22              |                  | 57                    | 7/2        | +4,733 (17)    | +52 (9)          |
| $^{27}\text{Al}$ | 27                    | 5/2        | +3,6455 (12)    | —                |                  | 58                    | 2          | +4,044 (8)     | +22 (3)          |
|                  | 28                    | 3          | 2,791 (1)       | —                |                  | 59                    | 7/2        | +4,627 (9)     | +40,4 (40)       |
| $^{29}\text{Si}$ | 29                    | 1/2        | -0,55529 (3)    | —                |                  | 60                    | 5          | +3,799 (8)     | +44 (5)          |
| $^{31}\text{P}$  | 31                    | 1/2        | 1,2349 (3)      | —                |                  | 60 $m$                | 2          | +4,40 (9)      | +30 (40)         |
|                  | 30                    | 1          | —               | —                | $^{28}\text{Ni}$ | 57                    | 3/2        | 0,88 (6)       | —                |
|                  | 31                    | 1/2        | +1,13160 (3)    | —                |                  | 61                    | 3/2        | -0,75002 (4)   | +16,2 (15)       |
|                  | 32                    | 1          | -0,2524 (3)     | —                |                  | 65                    | 5/2        | 0,69 (6)       | —                |
| $^{32}\text{S}$  | 31                    | 1/2        | 0,48793 (8)     | —                | $^{29}\text{Cu}$ | 60                    | 2          | +1,219 (3)     | —                |
|                  | 33                    | 3/2        | +0,643821 (1)   | -6,4 (10)        |                  | 61                    | 3/2        | +2,14 (4)      | —                |
|                  | 35                    | 3/2        | $\pm 1,00$      | +4,5 (10)        |                  | 62                    | 1          | -0,380 (4)     | —                |
| $^{37}\text{Cl}$ | 35                    | 3/2        | +0,8218736 (5)  | -8,249 (2)       |                  | 63                    | 3/2        | +2,2233 (2)    | -20,9 (3)        |
|                  | 36                    | 2          | +1,28547 (5)    | -1,80 (4)        |                  | 64                    | 1          | -0,217 (2)     | —                |
|                  | 37                    | 3/2        | +0,6841230 (5)  | -6,493 (2)       |                  | 65                    | 3/2        | +2,3817 (3)    | -19,5 (4)        |
|                  | 38                    | 2          | 2,05 (2)        | —                |                  | 66                    | 1          | -0,282 (2)     | —                |
| $^{38}\text{Ar}$ | 35                    | 3/2        | +0,633 (2)      | —                | $^{30}\text{Zn}$ | 63                    | 3/2        | -0,28164 (5)   | +29 (3)          |
|                  | 37                    | 3/2        | +0,95 (20)      | —                |                  | 65                    | 5/2        | +0,7690 (2)    | -2,3 (2)         |
|                  | 39                    | 7/2        | -1,3 (3)        | —                |                  | 67                    | 5/2        | +0,875478 (8)  | +15,0 (15)       |
| $^{39}\text{K}$  | 36                    | 2          | (+) 0,548 (1)   | —                | $^{31}\text{Ga}$ | 67                    | 3/2        | +1,8507 (3)    | +19,5            |
|                  | 37                    | 3/2        | +0,20321 (6)    | —                |                  | 68                    | 1          | 0,01175 (6)    | 2,77 (14)        |
|                  | 38                    | 3          | +1,3737 (10)    | —                |                  | 69                    | 3/2        | +2,01659 (4)   | +16,8            |
|                  | 39                    | 3/2        | +0,3914658 (4)  | +4,9 (4)         |                  | 71                    | 3/2        | +2,56227 (2)   | +10,6            |
|                  | 40                    | 4          | -1,298099 (3)   | -6,7 (8)         |                  | 72                    | 3          | -0,13224 (2)   | +52              |
|                  | 41                    | 3/2        | +0,2148699 (2)  | +6,0 (5)         | $^{32}\text{Ge}$ | 69                    | 5/2        | 0,735 (7)      | 2,4 (5)          |
|                  | 42                    | 2          | -1,1425 (6)     | —                |                  | 71                    | 1/2        | +0,547 (5)     | —                |
|                  | 43                    | 3/2        | 0,163 (2)       | —                |                  | 73                    | 9/2        | -0,8794669 (5) | -17,3 (26)       |
|                  | 45                    | 3/2        | 0,1734 (4)      | —                |                  | 75                    | 1/2        | +0,510 (5)     | —                |

| Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_n$    | $Q, \text{ фм}^2$ | Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_n$   | $Q, \text{ фм}^2$ |
|------------------|-----------------------|------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------------|------------|----------------|-------------------|
| $^{33}\text{As}$ | 70                    | 4          | 2,1 (2)         | —                 | $^{48}\text{Cd}$ | 109                   | 1/2        | -0,1306905 (2) | —                 |
|                  | 71                    | 5/2        | (+) 1,6735 (18) | —                 |                  | 109m                  | 7/2        | +4,27 (13)     | —                 |
|                  | 72                    | 2          | (-) 2,1578 (22) | —                 |                  | 110                   | 1          | 2,7271 (8)     | —                 |
|                  | 74                    | 2          | -1,597 (3)      | —                 |                  | 110m                  | 6          | +3,607 (4)     | 165 (10)          |
|                  | 75                    | 3/2        | +1,43947 (6)    | +29               |                  | 111                   | 1/2        | -0,146 (2)     | —                 |
| $^{34}\text{Se}$ | 76                    | 2          | -0,906 (5)      | —                 |                  | 112                   | 2          | 0,0547 (5)     | —                 |
|                  | 75                    | 5/2        | 0,67 (4)        | +100              |                  | 113                   | 1/2        | 0,159 (2)      | —                 |
|                  | 77                    | 1/2        | +0,534270 (8)   | —                 |                  | 105                   | 5/2        | -0,7393 (2)    | +43 (4)           |
|                  | 79                    | 7/2        | -1,018 (15)     | +80               |                  | 107                   | 5/2        | -0,615055 (1)  | +68 (7)           |
| $^{36}\text{Br}$ | 76                    | 1          | 0,5482 (1)      | 27                |                  | 109                   | 5/2        | -0,827846 (2)  | +69 (7)           |
|                  | 79                    | 3/2        | +2,106399 (4)   | +29,3             |                  | 111                   | 1/2        | -0,5948856 (9) | —                 |
|                  | 80                    | 1          | 0,5140 (6)      | 19,9 (8)          | $^{49}\text{In}$ | 111m                  | 11/2       | -1,1051 (4)    | -85 (9)           |
| $^{36}\text{Kr}$ | 80m                   | 5          | +1,3177 (6)     | +76 (3)           |                  | 113                   | 1/2        | -0,62306 (7)   | —                 |
|                  | 81                    | 3/2        | +2,270560 (4)   | +27 (2)           |                  | 113m                  | 11/2       | -1,087783 (2)  | -71 (7)           |
|                  | 82                    | 5          | +1,6270 (5)     | +76 (3)           |                  | 115                   | 1/2        | -0,648425 (1)  | —                 |
|                  | 83                    | 9/2        | -0,970669 (3)   | +27,0 (13)        |                  | 115m                  | 11/2       | -1,041034 (2)  | -54 (5)           |
|                  | 85                    | 9/2        | 1,005 (2)       | +45 (3)           |                  | 109                   | 9/2        | +5,53 (6)      | +89               |
| $^{37}\text{Rb}$ | 80                    | 1          | -0,0834 (3)     | —                 |                  | 110                   | 2          | +4,365 (4)     | +37               |
|                  | 81                    | 3/2        | +2,05 (2)       | —                 |                  | 111                   | 9/2        | +5,53 (6)      | +87               |
|                  | 82                    | 5          | +1,6434 (12)    | —                 |                  | 112                   | 1          | +2,82 (3)      | +9,3              |
|                  | 83                    | 5/2        | +1,43 (2)       | +27 (5)           |                  | 113                   | 9/2        | +5,5289 (2)    | +84,6             |
|                  | 84                    | 2          | -1,297 (11)     | +0,50 (13)        | $^{50}\text{Sn}$ | 113m                  | 1/2        | -0,21074 (2)   | —                 |
| $^{38}\text{Sr}$ | 85                    | 5/2        | +1,35303 (1)    | +27,4 (2)         |                  | 114                   | 1          | +1,7 (4)       | —                 |
|                  | 86                    | 2          | -1,6920 (14)    | +20 (3)           |                  | 114m                  | 5          | +4,7 (1)       | —                 |
|                  | 87                    | 3/2        | +2,75124 (1)    | +13,2 (1)         |                  | 115                   | 9/2        | +5,5408 (2)    | +86,1 (45)        |
|                  | 88                    | 2          | 0,508 (5)       | —                 |                  | 115m                  | 1/2        | -0,24398 (5)   | —                 |
| $^{38}\text{Y}$  | 87                    | 9/2        | -1,09282 (65)   | 15 (6)            |                  | 116                   | 1          | 2,7867 (8)     | 9 (2)             |
|                  | 89                    | 1/2        | -0,1374153 (3)  | —                 |                  | 116m                  | 5          | +4,22 (8)      | —                 |
|                  | 90                    | 2          | -1,630 (8)      | -15,5 (3)         | $^{51}\text{Sb}$ | 117m                  | 1/2        | -0,25174 (3)   | —                 |
| $^{40}\text{Zr}$ | 91                    | 1/2        | 0,1641 (8)      | —                 |                  | 113                   | 1/2        | 0,880 (9)      | —                 |
|                  | 91                    | 5/2        | -1,30362 (2)    | —                 |                  | 115                   | 1/2        | -0,91883 (7)   | —                 |
| $^{41}\text{Nb}$ | 90                    | 8          | 4,941 (4)       | —                 |                  | 117                   | 1/2        | -1,00104 (7)   | —                 |
|                  | 93                    | 9/2        | +6,1705 (3)     | -36 (7)           |                  | 119                   | 1/2        | -1,04728 (7)   | —                 |
|                  | 95                    | 9/2        | 6,123 (12)      | —                 |                  | 119m                  | 11/2       | -1,40 (8)      | 21 (2)            |
| $^{42}\text{Mo}$ | 97                    | 9/2        | 7,3 (14)        | —                 |                  | 121                   | 3/2        | 0,699 (7)      | 8 (4)             |
|                  | 95                    | 5/2        | -0,9142 (1)     | -1,9 (12)         | $^{52}\text{Te}$ | 115                   | 5/2        | +3,46 (1)      | -20 (4)           |
|                  | 97                    | 5/2        | -0,9335 (1)     | -10,2 (39)        |                  | 116                   | 3          | —              | —                 |
| $^{43}\text{Tc}$ | 93                    | 9/2        | 6,15 (74)       | —                 |                  | 117                   | 5/2        | 3,43 (6)       | -30 (5)           |
|                  | 94                    | 7          | 5,20 (25)       | —                 |                  | 118                   | 1          | 2,47 (7)       | —                 |
|                  | 95                    | 9/2        | 9,058 (140)     | —                 |                  | 118m                  | 8          | 2,32 (4)       | —                 |
|                  | 96                    | 7          | +5,37 (17)      | —                 |                  | 119                   | 5/2        | +3,45 (1)      | -21 (4)           |
|                  | 99                    | 9/2        | +5,6847 (4)     | (+) 34 (34)       |                  | 120                   | 1          | 2,34 (22)      | —                 |
| $^{44}\text{Ru}$ | 97                    | 5/2        | 0,687 (27)      | —                 |                  | 121                   | 5/2        | +3,3634 (3)    | -20 (3)           |
|                  | 99                    | 5/2        | -0,6413 (51)    | +7,6 (7)          |                  | 122                   | 2          | -1,905 (20)    | +47 (3)           |
|                  | 101                   | 5/2        | -0,7188 (60)    | +44 (4)           |                  | 123                   | 7/2        | +2,5498 (2)    | -26 (4)           |
|                  | 103                   | 5/2        | 0,67 (11)       | —                 |                  | 124                   | 3          | 1,20 (2)       | —                 |
|                  | 105                   | (3/2)      | <0,3            | —                 |                  | 125                   | 7/2        | +2,630 (35)    | —                 |
| $^{45}\text{Rh}$ | 101m                  | 9/2        | +5,51 (9)       | —                 |                  | 126                   | (8)        | 1,28 (7)       | —                 |
|                  | 102                   | (6)        | 4,11 (15)       | —                 |                  | 127                   | 7/2        | 2,59 (12)      | —                 |
|                  | 103                   | 1/2        | -0,08840 (2)    | —                 |                  | 128                   | 8          | 1,31 (19)      | —                 |
|                  | 103m                  | 7/2        | +4,78 (10)      | —                 |                  | 117                   | 1/2        | —              | —                 |
|                  | 105                   | (7/2)      | +4,428 (13)     | —                 |                  | 119                   | 1/2        | 0,25 (5)       | —                 |
| $^{46}\text{Pd}$ | 105                   | 5/2        | -0,642 (3)      | +80 (10)          |                  | 119m                  | 11/2       | 0,95 (5)       | —                 |
|                  | 102m                  | 2          | +4,14 (25)      | —                 |                  | 123                   | 1/2        | -0,73679 (2)   | —                 |
|                  | 103                   | 7/2        | +4,47 (5)       | —                 |                  | 123m                  | 11/2       | -1,00 (5)      | —                 |
|                  | 104                   | 5          | +4,0 (1)        | —                 |                  | 125                   | 1/2        | -0,88828 (3)   | —                 |
|                  | 104m                  | 2          | +3,7 (2)        | —                 |                  | 125m                  | 11/2       | -0,93 (5)      | —                 |
| $^{47}\text{Ag}$ | 105                   | 1/2        | 0,1014 (10)     | —                 |                  | 127                   | 3/2        | 0,66 (5)       | —                 |
|                  | 106                   | 1          | +2,85 (20)      | —                 |                  | 127m                  | 11/2       | -0,91 (5)      | —                 |
|                  | 106m                  | 6          | 3,71 (15)       | —                 |                  | 129                   | 3/2        | 0,66 (5)       | —                 |
|                  | 107                   | 1/2        | -0,113570 (20)  | —                 |                  | 129m                  | 11/2       | -1,15 (5)      | —                 |
|                  | 108                   | 1          | +2,6884 (7)     | —                 |                  | 131m                  | 11/2       | -1,04 (4)      | —                 |
|                  | 108m                  | 6          | 3,580 (20)      | 152 (8)           |                  |                       |            |                |                   |



| Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_n$   | $Q, \text{ фм}^2$ | Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_n$    | $Q, \text{ фм}^2$ |
|------------------|-----------------------|------------|----------------|-------------------|------------------|-----------------------|------------|-----------------|-------------------|
| $^{53}\text{I}$  | 125                   | 5/2        | 3,0 (10)       | -88,9             | $^{64}\text{Gd}$ | 155                   | 3/2        | -0,2591 (5)     | +159 (16)         |
|                  | 127                   | 5/2        | +2,81327 (8)   | -78,9             |                  | 157                   | 3/2        | -0,3398 (7)     | +203 (26)         |
|                  | 129                   | 7/2        | +2,6210 (3)    | -55,3             |                  | 159                   | 3/2        | -0,44 (3)       | —                 |
|                  | 131                   | 7/2        | +2,742 (1)     | -40 (1)           | $^{65}\text{Tb}$ | 156                   | 3          | 1,41 (18)       | +140 (45)         |
|                  | 132                   | 4          | 3,088 (7)      | 9 (1)             |                  | 157                   | 3/2        | 2,0 (1)         | —                 |
|                  | 133                   | 7/2        | +2,856 (5)     | -27 (1)           |                  | 158                   | 3          | +1,758 (7)      | +270 (50)         |
| $^{54}\text{Xe}$ | 129                   | 1/2        | -0,777976 (9)  | —                 |                  | 159                   | 3/2        | +2,014 (4)      | 118 (12)          |
|                  | 129m                  | 11/2       | -0,847 (28)    | —                 |                  | 160                   | 3          | +1,702 (8)      | +300 (50)         |
|                  | 131                   | 3/2        | +0,691861 (4)  | -12,0 (12)        | $^{66}\text{Dy}$ | 153                   | 7/2        | -0,72 (9)       | -15 (8)           |
|                  | 131m                  | 11/2       | -0,80 (10)     | —                 |                  | 155                   | 3/2        | -0,34 (3)       | +94 (10)          |
|                  | 133m                  | 11/2       | -0,87 (12)     | —                 |                  | 157                   | 3/2        | -0,30 (3)       | +127 (14)         |
| $^{55}\text{Cs}$ | 125                   | 1/2        | +1,41 (2)      | —                 |                  | 161                   | 5/2        | -0,4805 (51)    | +244 (17)         |
|                  | 127                   | 1/2        | +1,46 (2)      | —                 |                  | 163                   | 5/2        | +0,6726 (35)    | +257 (17)         |
|                  | 129                   | 1/2        | +1,482 (9)     | —                 |                  | 165                   | 7/2        | 0,51            | 280               |
|                  | 130                   | 1          | 1,4            | —                 | $^{67}\text{Ho}$ | 165                   | 7/2        | +4,173 (27)     | +273 (6)          |
|                  | 131                   | 5/2        | +3,543 (2)     | -62,0 (6)         |                  | 166m                  | (7)        | 4,1 (6)         | —                 |
|                  | 132                   | 2          | +2,222 (7)     | +50,8 (7)         | $^{68}\text{Er}$ | 161                   | 3/2        | -0,370 (5)      | +120 (9)          |
|                  | 133                   | 7/2        | +2,582023 (9)  | -0,3 (1)          |                  | 163                   | 5/2        | +0,57 (2)       | +220 (20)         |
|                  | 134                   | 4          | +2,9937 (9)    | +38,9 (3)         |                  | 165                   | 5/2        | 0,66 (3)        | 220 (10)          |
|                  | 134m                  | 8          | +1,0978 (2)    | —                 |                  | 167                   | 7/2        | -0,5665 (24)    | +282,7 (12)       |
|                  | 135                   | 7/2        | +2,7324 (2)    | +5,0 (2)          |                  | 169                   | 1/2        | +0,515 (25)     | —                 |
|                  | 136                   | 5          | +3,711 (15)    | 22,5 (10)         | $^{68}\text{Tm}$ | 171                   | 5/2        | 0,70 (5)        | 240 (20)          |
|                  | 137                   | 7/2        | +2,8413 (4)    | +5,1 (1)          |                  | 163                   | 1/2        | 0,081 (2)       | —                 |
|                  | 138                   | 3          | 0,48 (10)      | —                 |                  | 165                   | 1/2        | 0,139 (2)       | —                 |
| $^{56}\text{Ba}$ | 133                   | 1/2        | -0,769 (3)     | —                 |                  | 166                   | 2          | 0,092 (2)       | 185 (15)          |
|                  | 135                   | 3/2        | +0,837943 (17) | +18 (2)           |                  | 167                   | 1/2        | -0,197 (2)      | —                 |
|                  | 137                   | 3/2        | +0,937365 (20) | +28 (3)           |                  | 169                   | 1/2        | -0,235 (3)      | —                 |
|                  | 137m                  | 11/2       | —              | -5                |                  | 170                   | 1          | 0,2476 (36)     | 57,4 (9)          |
| $^{57}\text{La}$ | 137                   | 7/2        | +2,695 (6)     | +26 (8)           |                  | 171                   | 1/2        | 0,2303 (36)     | —                 |
|                  | 138                   | 5          | +3,7139 (3)    | +51 (9)           | $^{70}\text{Yb}$ | 169                   | 7/2        | -0,63 (2)       | +410 (6)          |
|                  | 139                   | 7/2        | +2,7832 (2)    | +22 (3)           |                  | 171                   | 1/2        | +0,49367 (1)    | —                 |
|                  | 140                   | 3          | +0,730 (15)    | +10,3 (11)        |                  | 173                   | 5/2        | -0,67989 (3)    | 280 (20)          |
| $^{58}\text{Ce}$ | 137                   | 3/2        | 0,91 (15)      | —                 |                  | 175                   | 7/2        | 0,40 (5)        | —                 |
|                  | 137m                  | 11/2       | 0,70 (3)       | —                 | $^{71}\text{Lu}$ | 171                   | 7/2        | 2,03 (10)       | —                 |
|                  | 139                   | 3/2        | 0,96 (20)      | —                 |                  | 172                   | 4          | 2,25 (10)       | —                 |
|                  | 141                   | 7/2        | 0,970 (30)     | —                 |                  | 173                   | 7/2        | 2,34 (9)        | —                 |
|                  | 143                   | 3/2        | ~1             | —                 |                  | 174                   | (1)        | 1,94 (28)       | —                 |
| $^{59}\text{Pr}$ | 141                   | 5/2        | 4,136 (2)      | -5,89 (42)        |                  | 174m                  | (6)        | 2,34 (33)       | —                 |
|                  | 142                   | 2          | +0,234 (1)     | +2,97 (85)        |                  | 175                   | 7/2        | +2,2327 (11)    | +568 (6)          |
|                  | 142m                  | 5          | 2,2 (1)        | —                 |                  | 176                   | 7          | +3,19 (3)       | +800 (70)         |
|                  | 143                   | 7/2        | —              | —                 |                  | 176m                  | 1          | +0,318 (3)      | -239 (4)          |
| $^{60}\text{Nd}$ | 143                   | 7/2        | -1,065 (5)     | -48,4 (20)        |                  | 177                   | 7/2        | +2,239 (11)     | +551 (6)          |
|                  | 145                   | 7/2        | -0,656 (4)     | -25,3 (10)        | $^{72}\text{Hf}$ | 177m                  | 23/2       | 2,75 (21)       | —                 |
|                  | 147                   | 5/2        | 0,578 (3)      | 90 (30)           |                  | 175                   | 5/2        | 0,70 (10)       | +270 (40)         |
|                  | 149                   | 5/2        | 0,351 (10)     | 130 (30)          |                  | 177                   | 7/2        | +0,7935 (6)     | +450 (50)         |
| $^{61}\text{Pm}$ | 143                   | 5/2        | 3,78 (50)      | —                 |                  | 179                   | 9/2        | -0,6409 (13)    | +510 (50)         |
|                  | 144                   | 5          | 1,69 (14)      | —                 |                  | 179m <sub>2</sub>     | 25/2       | 7,43 (34)       | —                 |
|                  | 147                   | 7/2        | +2,58 (7)      | +74 (20)          |                  | 180m                  | 8          | +8,7 (10)       | +440 (50)         |
|                  | 148                   | 1          | 1,84 (19)      | +20 (20)          | $^{73}\text{Ta}$ | 181                   | 7/2        | 2,371           | +390              |
|                  | 148m                  | 6          | 1,82 (18)      | —                 |                  | 182                   | 3          | 2,6 (2)         | —                 |
|                  | 149                   | 7/2        | 3,3 (5)        | —                 | $^{74}\text{W}$  | 183                   | 1/2        | +0,1177847 (1)  | —                 |
|                  | 151                   | 5/2        | 1,8 (2)        | 190 (30)          |                  | 187                   | 3/2        | 0,688 (21)      | —                 |
| $^{62}\text{Sm}$ | 145                   | 7/2        | 0,92 (6)       | —                 | $^{75}\text{Re}$ | 181                   | 5/2        | 3,242 (65)      | —                 |
|                  | 147                   | 7/2        | -0,8148 (7)    | -18 (3)           |                  | 183                   | (5/2)      | 3,03 (11)       | —                 |
|                  | 149                   | 7/2        | -0,6717 (7)    | +5,2 (9)          |                  | 184                   | 3          | 2,499 (51)      | —                 |
|                  | 151                   | 5/2        | 0,355 (15)     | —                 |                  | 184m                  | 8          | 2,86 (13)       | —                 |
|                  | 153                   | 3/2        | -0,0216 (1)    | +100 (10)         |                  | 185                   | 5/2        | +3,1871 (3)     | 236 (50)          |
|                  | 155                   | 3/2        | —              | 90 (10)           |                  | 186                   | 1          | +1,739 (3)      | ~40               |
| $^{63}\text{Eu}$ | 151                   | 5/2        | +3,4717 (6)    | +115 (9)          |                  | 187                   | 5/2        | +3,2197 (3)     | 224 (50)          |
|                  | 152                   | 3          | -1,9414 (13)   | +316 (35)         |                  | 188                   | 1          | +1,788 (5)      | -40               |
|                  | 153                   | 5/2        | +1,5330 (8)    | +294 (23)         | $^{76}\text{Os}$ | 187                   | 1/2        | +0,06465184 (6) | —                 |
|                  | 154                   | 3          | 2,005 (6)      | +390 (50)         |                  | 189                   | 3/2        | 0,659933 (4)    | +91 (10)          |
|                  | 155                   | 5/2        | 1,93 (26)      | —                 |                  | 193                   | (3/2)      | 1,30 (19)       | —                 |

| Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_n$   | $Q, \text{ фм}^2$ |
|------------------|-----------------------|------------|----------------|-------------------|
| $^{77}\text{Ir}$ | 191                   | 3/2        | +0,1461 (6)    | 78 (20)           |
|                  | 191 $m$               | 11/2       | 6,026 (36)     | —                 |
|                  | 192                   | 4          | +1,880 (11)    | —                 |
|                  | 193                   | 3/2        | +0,1591 (6)    | 70 (18)           |
|                  | 194                   | 1          | 0,37 (4)       | —                 |
| $^{78}\text{Pt}$ | 195                   | 1/2        | +0,60949 (6)   | —                 |
|                  | 195 $m$               | 13/2       | 0,597 (15)     | —                 |
|                  | 197                   | 1/2        | 0,51 (2)       | —                 |
| $^{79}\text{Au}$ | 190                   | 1          | 0,066          | —                 |
|                  | 191                   | 3/2        | 0,138 (7)      | —                 |
|                  | 192                   | 1          | 0,0079 (11)    | —                 |
|                  | 193                   | 3/2        | 0,140 (7)      | —                 |
|                  | 194                   | 1          | 0,074 (4)      | —                 |
|                  | 195                   | 3/2        | 0,148 (7)      | —                 |
|                  | 195 $m$               | 11/2       | 6,268 (31)     | —                 |
|                  | 196                   | 2          | +0,5914 (14)   | —                 |
|                  | 196 $m_2$             | 12         | 5,35 (20)      | —                 |
|                  | 197                   | 3/2        | +0,145746 (9)  | 59,4 (10)         |
|                  | 198                   | 2          | +0,5934 (4)    | —                 |
|                  | 198 $m$               | (12)       | 5,55 (35)      | —                 |
| $^{80}\text{Hg}$ | 199                   | 3/2        | +0,2715 (7)    | —                 |
|                  | 200 $m$               | 12         | 6,10 (20)      | —                 |
|                  | 181                   | 1/2        | +0,5071 (7)    | —                 |
|                  | 183                   | 1/2        | +0,524 (5)     | —                 |
|                  | 185                   | 1/2        | +0,507 (4)     | —                 |
|                  | 187                   | 3/2        | -0,593 (4)     | -50 (23)          |
|                  | 191                   | (3/2)      | —              | -41 (41)          |
|                  | 193                   | 3/2        | -0,62757 (18)  | -86 (38)          |
|                  | 193 $m$               | 13/2       | -1,058429 (3)  | +108 (10)         |
|                  | 195                   | 1/2        | +0,541475 (1)  | —                 |
|                  | 195 $m$               | 13/2       | -1,044647 (3)  | +127 (11)         |
|                  | 197                   | 1/2        | +0,5273741 (9) | —                 |
|                  | 197 $m$               | 13/2       | -1,027684 (3)  | +147 (13)         |
| $^{81}\text{Tl}$ | 199                   | 1/2        | +0,5058851 (9) | —                 |
|                  | 199 $m$               | 13/2       | -1,014702 (3)  | +140 (42)         |
|                  | 201                   | 3/2        | -0,560225 (1)  | +45,5 (40)        |
|                  | 203                   | 5/2        | +0,84895 (13)  | +40 (4)           |
|                  | 205                   | 1/2        | +0,6010 (1)    | —                 |
|                  | 194                   | 2          | 0,14 (1)       | —                 |
|                  | 195                   | 1/2        | +1,58 (4)      | —                 |
|                  | 196                   | 2          | 0,07 (1)       | —                 |
|                  | 197                   | 1/2        | +1,58 (2)      | —                 |
|                  | 198                   | 2          | 0,00 (1)       | —                 |
| $^{82}\text{Pb}$ | 198 $m$               | 7          | 0,64 (7)       | —                 |
|                  | 199                   | 1/2        | +1,60 (2)      | —                 |
|                  | 200                   | 2          | 0,04 (1)       | —                 |
|                  | 201                   | 1/2        | +1,61 (2)      | —                 |
|                  | 202                   | 2          | 0,06 (1)       | —                 |
|                  | 203                   | 1/2        | +1,622257 (1)  | —                 |
|                  | 204                   | 2          | 0,0908         | —                 |
|                  | 205                   | 1/2        | +1,6382134 (7) | —                 |
|                  | 207                   | 1/2        | 0,58219 (2)    | —                 |
|                  | 203                   | 9/2        | +4,62 (5)      | -64 (5)           |
|                  | 204                   | 6          | +4,28 (5)      | -41 (5)           |
|                  | 205                   | 9/2        | 4,16 (11)      | —                 |
| $^{83}\text{Bi}$ | 206                   | 6          | +4,59 (5)      | -19 (5)           |
|                  | 207                   | 9/2        | 4,10 (2)       | -50 (15)          |
|                  | 209                   | 9/2        | +4,1106 (2)    | -46               |
|                  | 210                   | 1          | -0,0446 (1)    | +13 (1)           |

| Элемент          | Массовое<br>число $A$ | $I, \hbar$ | $\mu, \mu_n$ | $Q, \text{ фм}^2$ |
|------------------|-----------------------|------------|--------------|-------------------|
| $^{84}\text{Po}$ | 205                   | 5/2        | $\sim +0,26$ | +17               |
|                  | 207                   | 5/2        | $\sim +0,27$ | +28               |
|                  | 209                   | 1/2        | $\sim +0,77$ | —                 |
| $^{85}\text{At}$ | 211                   | 9/2        | —            | —                 |
|                  | 213                   | 9/2        | —            | —                 |
| $^{89}\text{Ac}$ | 227                   | 3/2        | +1,1 (1)     | +170 (20)         |
| $^{90}\text{Th}$ | 229                   | 5/2        | +0,46 (4)    | +430 (90)         |
| $^{91}\text{Pa}$ | 231                   | 3/2        | 2,01 (2)     | —                 |
|                  | 233                   | 3/2        | +3,5 (8)     | -300              |
| $^{92}\text{U}$  | 233                   | 5/2        | +0,55        | +350              |
|                  | 235                   | 7/2        | -0,35        | 455 (9)           |
| $^{93}\text{Np}$ | 237                   | 5/2        | +3,14 (4)    | +410 (70)         |
|                  | 238                   | 2          | —            | —                 |
| $^{94}\text{Pu}$ | 239                   | 1/2        | +0,203 (4)   | —                 |
|                  | 241                   | 5/2        | -0,683 (15)  | +560 (200)        |
| $^{95}\text{Am}$ | 241                   | 5/2        | +1,61 (3)    | +490              |
|                  | 242                   | 1          | +0,3878 (15) | -276              |
|                  | 243                   | 5/2        | +1,61 (4)    | +490              |
| $^{96}\text{Cm}$ | 243                   | 5/2        | 0,41         | —                 |
|                  | 245                   | 7/2        | 0,5 (1)      | —                 |
|                  | 247                   | 9/2        | 0,37         | —                 |
| $^{97}\text{Bk}$ | 249                   | 7/2        | 2,0 (4)      | +579              |
| $^{98}\text{Es}$ | 253                   | 7/2        | 4,70 (7)     | 670 (80)          |
|                  | 254 $m$               | 2          | 2,90 (7)     | 370 (50)          |

## 37.4. РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ [2]

На рис. 37.1—37.4 представлены соответственно радиоактивные ряды тория, нептуния, урана-радия и урана-актиния. Указаны химический символ элемента, массовое число ядра и его период полураспада. Символы у стрелок указывают тип распада ( $\alpha, \beta$  и п.). Если нуклид распадается двумя путями, то у стрелок указано относительное ветвление типов распада.

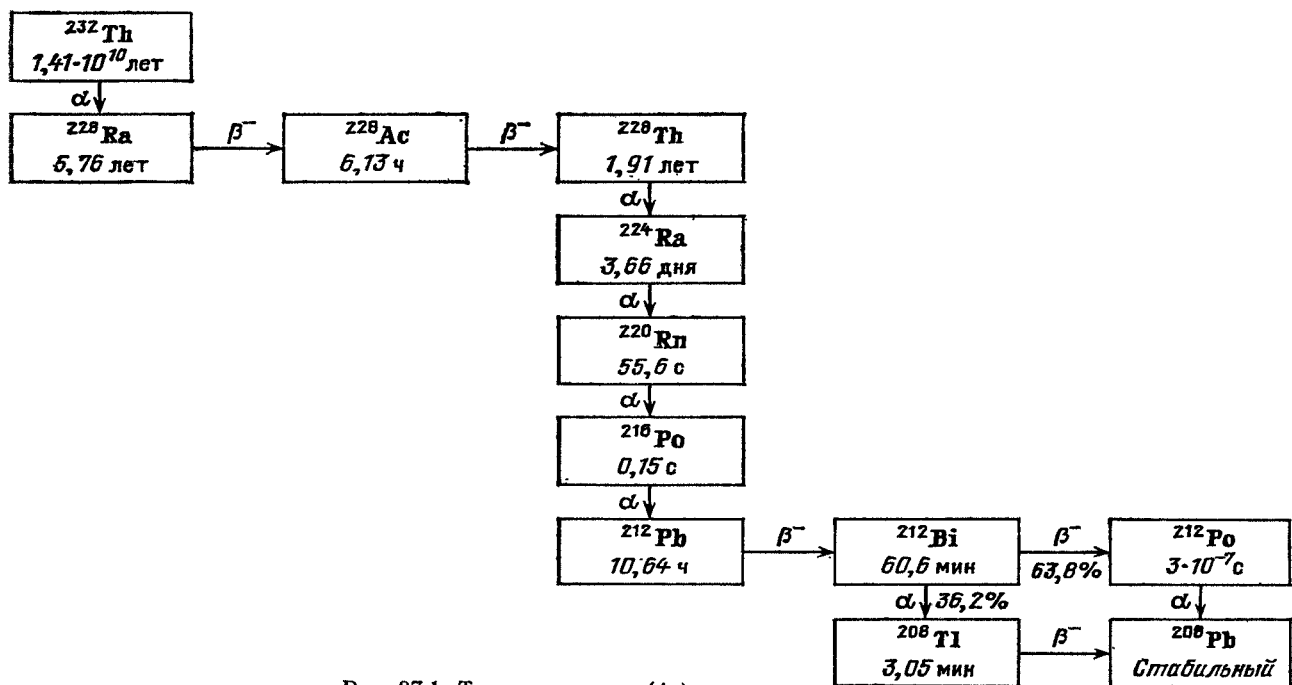


Рис. 37.1. Ториевая серия (4n)

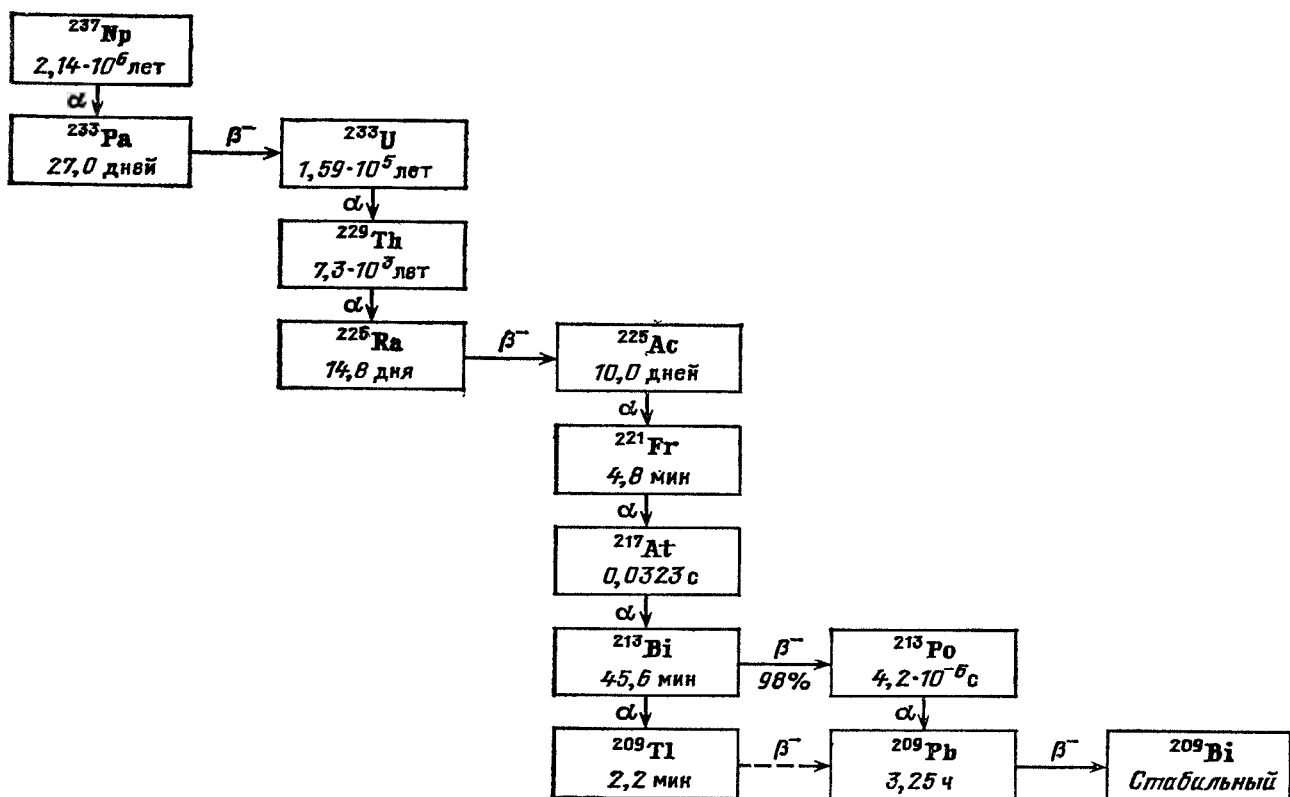


Рис. 37.2. Нептуниевая серия (4n+1)

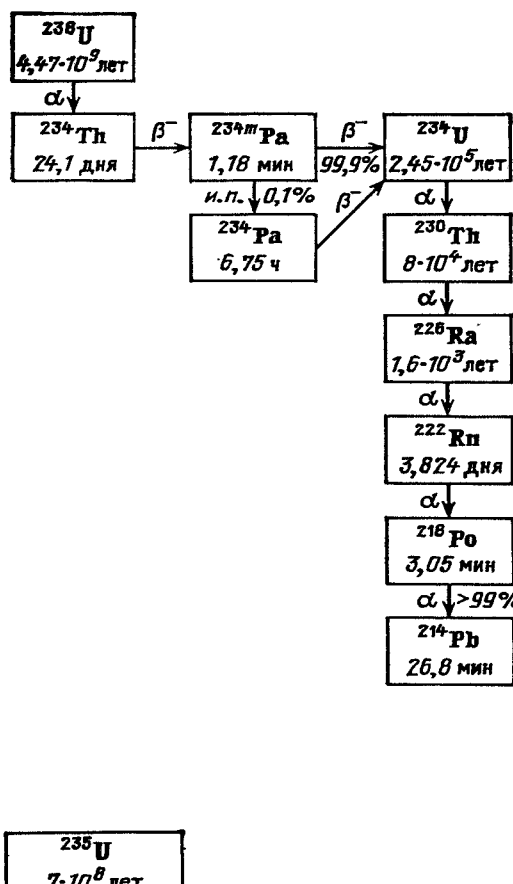


Рис. 37.3. Уран-радиевая серия (4n+2)

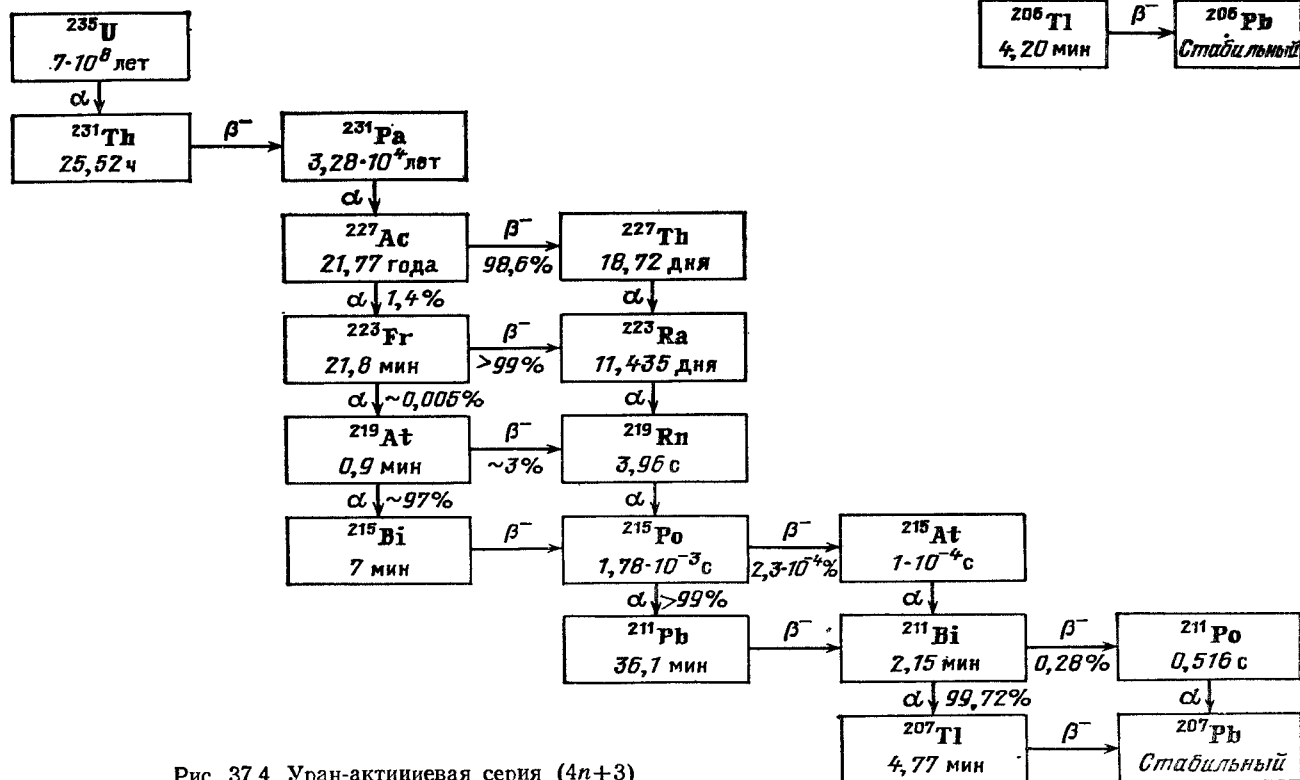


Рис. 37.4. Уран-актиниевая серия (4n+3)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Table of Isotopes. — 7th ed./Ed. by C. M. Lederer and V. S. Shirley. N. Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1978.
2. Seelmann-Eggebert W., Pfennig G., Münzel H., Klewe-Nebenius H. Nuklidkarte, 5 Auflage. München: Gerbach und Sohn Verlag, 1981.

3. Баранов С. А., Кулаков В. М., Шатинский В. М.// Ядерная физика. 1969. Т. 7, вып. 4. С. 724—730; 1971. Т. 14, вып. 5. С. 1101—1102.
4. Greenwood R. C., Helmer R. G., Gehrke R. J.// Nucl. Instrum. Methods. 1979. Vol. 159. P. 465.
5. Holden N. E., Martin R. L., Baner I. L.//Pure Appl. Chem. 1984. Vol. 56, N 6. P. 675—702.

## Глава 38

### МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА

С. С. Якимов, В. М. Черепанов

#### 38.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Эффект Мёссбауэра или ядерный гамма-резонанс (ЯГР) — это бесфононное (т. е. без потерь энергии на отдачу) излучение или поглощение резонансных  $\gamma$ -квантов ядрами атомов, находящихся в конденсированной среде.

Высокое энергетическое разрешение ЯГР  $\Gamma_0/E_0 \approx 10^{-10} \div 10^{-15}$  ( $\Gamma_0 = \hbar/\tau$ ) — естественная ширина ядерного уровня;  $\tau$  — среднее время жизни возбужденного ядра;  $E_0 = E_e - E_g$  — энергия  $\gamma$ -перехода между возбужденным  $e$  и основным  $g$  состояниями ядра) позволяет не только измерять очень малые изменения энергии (порядка  $10^{-10}$  эВ), но и наблюдать сверхтонкую структуру ядерных уровней, вызванную электрическими и магнитными электронно-ядерными взаимодействиями.

Спектр прошедшего через поглотитель излучения, получаемый обычно в ЯГР при относительном (со скоростью  $v$ ) движении резонансного источника и поглотителя, обусловлен изменением энергии  $\gamma$ -квантов  $\Delta E = E - E_0 = E_0 v/c$  ( $c$  — скорость света) в результате эффекта Доплера и определяется выражением

$$\varepsilon(v) = [N(\infty) - N(v)]/[N(\infty) - N_\Phi],$$

где  $N(\infty)$  — интенсивность вне резонанса;  $N(v)$  — интенсивность при относительной скорости  $v$ ;  $N_\Phi$  — не зависящая от  $v$  интенсивность фона, определяемая из дополнительного эксперимента. Аналитическое выражение для спектра в случае «тонкого» источника (без самопоглощения) и поглотителя с одиночной линией при условии совпадения в них энергий переходов (см., например, [1]):

$$\varepsilon(v) = f_S \int_{-\infty}^{\infty} F(E) \{1 - \exp[-f_A n_A \sigma(E)]\} dE,$$

где  $F(E) = [\Gamma_0/2\pi] \{[E - E_0(1 + v/c)]^2 + (\Gamma_0/2)^2\}^{-1}$  — для лоренцевой формы линии излучения источника;  $f_S, f_A$  — вероятности излучения и поглощения  $\gamma$ -квантов;  $n_A$ , см $^{-2}$  — число ядер резонансного нуклида на 1 см $^2$ ;  $\sigma = (2\pi c^2 \hbar^2/E_0^2) [(E - E_0)^2 + (\Gamma_0/2)^2]^{-1}$  — сечение поглощения  $\gamma$ -кванта с энергией  $E$ ;  $\sigma_0 = (2\pi c^2 \hbar^2/E_0^2) [(2I_e + 1)/(2I_g + 1)]/(1 + \alpha_T)$  — сечение при  $E = E_0$ ;  $I_g, I_e$  — спины ядра в основном и возбужденном состояниях;  $\alpha_T$  — полный коэффициент внутренней конверсии.

Максимальное поглощение  $\varepsilon(v=0)$  и площадь спектра  $S$  даются выражениями:

$$\varepsilon(0) = f_S [1 - \exp(-t_A/2) I_0(it_A/2)];$$

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(v) dv = (\pi \Gamma_0/2) f_S t_A \times$$

$$\times \exp(-t_A/2) [I_0(it_A/2) + I_1(it_A/2)],$$

где  $I_0$  и  $I_1$  — функции Бесселя нулевого и первого порядков от мнимого аргумента;  $t_A = f_S n_A \sigma(E_0)$  — эффективная толщина поглотителя.

Если источник не тонкий, то при учете самопоглощения в нем формула для  $\varepsilon(0)$  приобретает вид [2]:

$$\varepsilon(0) = [f_S/K(t_S)] [K(t_S) + K(t_A) - K(t_S + t_A)],$$

где  $K(x) = x \exp(-x/2) [I_0(ix/2) + I_1(ix/2)]$ ;  $x = t_S, t_A, t_S + t_A$ ;  $t_S = f_S n_S \sigma(E_0)$ , а площадь спектра не зависит от формы линии излучения.

Основными считаются следующие параметры мёссбауэровских спектров [3—6].

1. *Изомерный (химический) сдвиг  $\delta$  мессбауэровской линии*, обусловленный разностью радиусов ядра в возбужденном и основном состояниях  $\Delta R = R_e - R_g$  и разностью плотностей электронов на ядрах поглотителя и источника  $|\psi_A(0)|^2$  и  $|\psi_S(0)|^2$  соответственно:

$$\delta = A \frac{\Delta R}{R} \left[ |\psi_A(0)|^2 - |\psi_S(0)|^2 \right],$$

где  $A = (4\pi/5) e^2 R^2 Z S(Z)$ ;  $e$  — элементарный заряд;  $Z$  — заряд ядра;  $S(Z)$  — зависящий от  $Z$  релятивистский множитель, протабулированный в [7].

При различии температур источника и поглотителя возникает дополнительный, так называемый температурный сдвиг линии поглощения в результате релятивистского эффекта Доплера второго порядка по  $v/c$ :

$$\delta_T = -E_0 \langle v^2 \rangle / (2c^2),$$

где  $\langle v^2 \rangle$  — средняя квадратическая скорость мессбауэровского атома.

В классическом пределе, справедливом при высоких температурах,

$$\delta_T = -E_0 \cdot 3 \cdot kT / (2 Mc^2),$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура;  $M$  — масса атома.

2. *Квадрупольное расщепление  $\Delta$  ядерных уровней*, вызванное взаимодействием квадрупольного момента ядра  $Q$  с неоднородным электрическим полем  $q = \text{grad } E$ , описываемым гамильтонианом

$$\mathcal{H} = \frac{eqQ}{4I(2I-1)} \left[ 3I_z^2 - I(I+1) \right] + \frac{\eta}{2} \left( I_+^2 - I_-^2 \right),$$

где  $I_{\pm} = I_x \pm iI_y$ . Он имеет собственные значения

$$E_Q = \frac{eqQ}{4I(2I-1)} \left[ 3m_I^2 - I(I+1) \right] (1 + \eta^2/3)^{1/2}, \quad m_I = I, I-1, \dots, -I.$$

Параметр асимметрии имеет вид  $\eta = (V_{xx} - V_{yy})/V_{zz}$ , где  $|V_{zz}| \geq |V_{xx}| \geq |V_{yy}|$ ;  $V_{xx} = \partial^2 V / \partial x^2$ ;  $V_{yy} = \partial^2 V / \partial y^2$ ;  $V_{zz} = \partial^2 V / \partial z^2$ ;  $V$  — потенциал электрического поля.

В частном случае аксиально-симметричного градиента поля для ядра  $^{57}\text{Fe}$  ( $I_g = 1/2$ ,  $I_e = 3/2$ ) линия расщепляется на дублет с расстоянием между компонентами

$$\Delta = E(3/2, 3/2) - E(3/2, 1/2) = eqQ/2,$$

где  $q = V_{zz}$  — градиент электрического поля.

3. *Магнитное расщепление ядерных уровней*, вызванное сверхтонким взаимодействием дипольного магнитного момента ядра  $\bar{\mu}$  с магнитным полем на ядре  $H_n$ , которое создается электронами собственного атома и магнитными моментами соседних атомов, а также поляризованными электронами проводимости [3—6].

Магнитное взаимодействие приводит к полному снятию вырождения ядерных уровней, положения которых выражаются формулой

$$E_{m_I} = -\mu_n H_n m_I / I,$$

где  $\mu_n$  — ядерный магнетон;  $m_I$  — магнитное квантовое число (правила отбора для магнитных дипольных переходов  $\Delta m_I = 0, \pm 1$ ).

Расстояние между соседними эквидистантными подуровнями  $\Delta E_m = g \mu_n H_n$ , где  $g$  — гиромагнитное отношение (ядерный  $g$ -фактор).

При добавлении к магнитному дипольному электрического квадрупольного взаимодействия эквидистантность подуровней нарушается. Для  $\Delta \ll \Delta E_n$  положения ядерных подуровней определяются соотношением:

$$E = -\mu_n H_n m_I / I + (-1)^{|m_I|+1/2} eqQ (3 \cos^2 \theta - 1) / 8,$$

где  $\theta$  — угол между осью  $z$  градиента электрического поля и направлением магнитного поля.

### 38.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕССБАУЭРОВСКИХ ЯДЕР

В табл. 38.1 приведены следующие характеристики мессбауэровских ядер [8, 9]:

символ изотопа с массовым числом;  
содержание мессбауэровского изотопа в естественной смеси;

$E_0$  — энергия мессбауэровского перехода;

$T_{1/2}$  — период полураспада резонансного уровня;

$\Gamma$  — минимальная наблюдаемая ширина линии, определяемая по формуле  $\Gamma = 2 \ln 2 (\hbar / T_{1/2})$ ;

$E_R$  — энергия отдачи свободного ядра;

$\alpha_T$  — полный коэффициент внутренней конверсии;

$\sigma_0$  — полное сечение резонансного поглощения;

$I_g, I_e$  — значения спина основного и возбужденного состояний ядра;

$\mu_g, \mu_e$  — значения магнитного момента основного и возбужденного состояний ядра (в ядерных магнетонах);

$Q_g, Q_e$  — значения квадрупольного момента основного и возбужденного состояний ядра;

сведения о материнских изотопах мессбауэровского ядра (массовое число, тип распада, период полураспада, э. з. — электронный захват).

Таблица 38.1. Значения характеристик мессбауэровских ядер

| Ядро              | Содержа-<br>ние, % | E, кэВ | T <sub>1/2</sub> , нс | Г, мм/с               | E <sub>R</sub> ,<br>10 <sup>-8</sup> эВ | α <sub>T</sub> | σ <sub>0</sub> ,<br>10 <sup>-20</sup> см <sup>2</sup> | I <sub>g</sub>      | I <sub>e</sub>      | μ <sub>g</sub> | μ <sub>e</sub> | Q <sub>g</sub> ,<br>10 <sup>-24</sup> см <sup>2</sup> | Q <sub>e</sub> ,<br>10 <sup>-24</sup> см <sup>2</sup> | Сведения о материнском ядре                                                                       |
|-------------------|--------------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <sup>40</sup> K   | 0,012              | 29,56  | 4,25                  | 2,177                 | 11,73                                   | 0,35           | 28,65                                                 | 4 <sup>-</sup>      | 3 <sup>-</sup>      | -1,298         | —              | -0,093                                                | —                                                     | <sup>39</sup> K (α, γ) (d, p)                                                                     |
| <sup>57</sup> Fe  | 2,14               | 14,413 | 97,81                 | 0,194                 | 1,956                                   | 8,21           | 255,8                                                 | 1 <sup>-</sup><br>2 | 3 <sup>-</sup><br>2 | 0,09060        | -0,1553        | 0                                                     | +0,21                                                 | <sup>57</sup> Co (α, β, γ, 270 сут),<br><sup>57</sup> Mn (β <sup>-</sup> , 1,6 млн)               |
| <sup>57</sup> Fe  | 2,14               | 136,48 | 8,7                   | 0,230                 | 175,4                                   | 0,14           | 34,50                                                 | 1 <sup>-</sup><br>2 | 5 <sup>-</sup><br>2 | 0,09060        | -0,9785        | 0                                                     | —                                                     | —                                                                                                 |
| <sup>61</sup> Ni  | 1,19               | 67,408 | 5,27                  | 0,770                 | 39,98                                   | 0,13           | 71,16                                                 | 3 <sup>-</sup><br>2 | 5 <sup>-</sup><br>2 | -0,7498        | +0,478         | +0,162                                                | -0,20                                                 | <sup>61</sup> Co (β <sup>-</sup> , 99 мин),<br><sup>61</sup> Cu (α, β, γ, 3,41 ч)                 |
| <sup>67</sup> Zn  | 4,11               | 93,317 | 9150                  | 32·10 <sup>-5</sup>   | 69,77                                   | 0,89           | 4,955                                                 | 5 <sup>-</sup><br>2 | 1 <sup>-</sup><br>2 | +0,8755        | +0,578         | 0                                                     | —                                                     | <sup>67</sup> Ga (α, β, γ, 78 ч),<br><sup>67</sup> Cu (β <sup>-</sup> , 59 ч)                     |
| <sup>76</sup> Ge  | 7,76               | 13,263 | 2953                  | 0,007                 | 1,293                                   | 1095           | 0,761                                                 | 9 <sup>+</sup><br>2 | 5 <sup>+</sup><br>2 | -0,8792        | -0,941         | -0,18                                                 | —                                                     | <sup>76</sup> As (α, β, γ, 80,3 сут),<br><sup>76</sup> Ga (β <sup>-</sup> , 4,9 ч)                |
| <sup>76</sup> Ge  | 7,76               | 68,752 | 1,86                  | 2,139                 | 34,76                                   | 0,8            | 22,88                                                 | 9 <sup>+</sup><br>2 | 7 <sup>+</sup><br>2 | —              | —              | —                                                     | —                                                     | —                                                                                                 |
| <sup>83</sup> Kr  | 11,55              | 9,40   | 147                   | 0,198                 | 0,571                                   | 19,6           | 107,5                                                 | 9 <sup>+</sup><br>2 | 7 <sup>+</sup><br>2 | -0,9703        | -0,942         | +0,253                                                | +0,43                                                 | <sup>83</sup> Br (β <sup>-</sup> , 2,39 ч),<br><sup>83</sup> Rb (α, β, γ, 86,2 сут)               |
| <sup>89</sup> Tc  | 0                  | 140,51 | 0,237                 | 8,215                 | 107,1                                   | 0,15           | 8,621                                                 | 9 <sup>-</sup><br>2 | 7 <sup>+</sup><br>2 | +5,6807        | +3,7           | +0,34                                                 | —                                                     | <sup>89</sup> Mo (β <sup>-</sup> , 6,7 ч)                                                         |
| <sup>99</sup> Ru  | 12,72              | 89,36  | 20,5                  | 0,149                 | 43,30                                   | 1,5            | 8,042                                                 | 5 <sup>+</sup><br>2 | 3 <sup>+</sup><br>2 | -0,638         | -0,28          | +0,12                                                 | +0,34                                                 | <sup>99</sup> Rh (α, β, γ, 16,1 сут),<br><sup>99m</sup> Rh (α, β, γ, 4,7 ч)                       |
| <sup>101</sup> Ru | 17,07              | 127,22 | 0,581                 | 3,701                 | 86,02                                   | 0,16           | 8,688                                                 | 5 <sup>+</sup><br>2 | 3 <sup>+</sup><br>2 | -0,63          | -0,31          | —                                                     | —                                                     | <sup>101</sup> Rh (α, β, γ, 3 года),<br><sup>101</sup> Tc (β <sup>-</sup> , 14,0 мин)             |
| <sup>107</sup> Ag | 51,4               | 93,1   | 44,3·10 <sup>9</sup>  | 6,6·10 <sup>-11</sup> | 43,4                                    | 20             | 5,3                                                   | 1 <sup>-</sup><br>2 | 7 <sup>+</sup><br>2 | -0,1136        | —              | 0                                                     | —                                                     | <sup>107</sup> Cd (α, β, γ, 6,6 ч),<br><sup>107</sup> Pd (β <sup>-</sup> , 7·10 <sup>6</sup> лет) |
| <sup>117</sup> Sn | 7,61               | 158,53 | 0,277                 | 6,230                 | 115,3                                   | 0,159          | 16,80                                                 | 1 <sup>+</sup><br>2 | 3 <sup>+</sup><br>2 | +1,0001        | —              | 0                                                     | —                                                     | <sup>117</sup> Sb (α, β, γ, 2,8 ч),<br><sup>117m</sup> In (β <sup>-</sup> , 1,93 ч)               |
| <sup>119</sup> Sn | 8,58               | 23,871 | 17,86                 | 0,642                 | 2,570                                   | 5,1            | 140,3                                                 | 1 <sup>+</sup><br>2 | 3 <sup>+</sup><br>2 | -1,0461        | +0,633         | 0                                                     | -0,064                                                | <sup>119m</sup> Sn (245 сут),<br><sup>119</sup> Sb (α, β, γ, 38 ч)                                |
| <sup>121</sup> Sb | 57,25              | 37,138 | 3,5                   | 2,105                 | 6,118                                   | 11,1           | 19,55                                                 | 5 <sup>+</sup><br>2 | 7 <sup>+</sup><br>2 | +3,3591        | +2,47          | -0,28                                                 | -0,38                                                 | <sup>121m</sup> Sn (β <sup>-</sup> , 50 лет)                                                      |
| <sup>125</sup> Te | 6,99               | 35,492 | 1,481                 | 5,204                 | 5,409                                   | 13,6           | 26,51                                                 | 1 <sup>+</sup><br>2 | 3 <sup>+</sup><br>2 | -0,8872        | +0,60          | 0                                                     | -0,20                                                 | <sup>125</sup> Sb (β <sup>-</sup> , 2,7 лет),<br><sup>125</sup> I (α, β, γ, 60 сут)               |

|                   |       |        |       |       |       |      |       |                 |                 |         |        |        |       |                                                                                                       |
|-------------------|-------|--------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------|-----------------|---------|--------|--------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $^{127}\text{I}$  | 100   | 57,60  | 1,95  | 2,435 | 14,02 | 3,78 | 20,57 | $\frac{5^+}{2}$ | $\frac{7^+}{2}$ | +2,8091 | +2,54  | -0,79  | +0,70 | $^{127m}\text{Te}$ ( $\beta^-$ , 109 сут),<br>$^{127}\text{Xe}$ ( $\alpha$ , 3, 36,4 сут)             |
| $^{129}\text{I}$  | 0     | 27,77  | 16,80 | 0,586 | 3,209 | 5,1  | 39,01 | $\frac{7^+}{2}$ | $\frac{5^+}{2}$ | +2,6174 | +2,797 | -0,55  | -0,68 | $^{129m}\text{Te}$ ( $\beta^-$ , 34 сут)                                                              |
| $^{129}\text{Xe}$ | 26,44 | 39,581 | 1,01  | 6,843 | 6,519 | 12,3 | 23,48 | $\frac{1^+}{2}$ | $\frac{3^+}{2}$ | -0,7768 | +0,68  | 0      | -0,41 | $^{129}\text{I}$ ( $\beta^-$ , 1,57·10 <sup>7</sup> лет),<br>$^{129}\text{Cs}$ ( $\alpha$ , 3, 2,2 ч) |
| $^{131}\text{Xe}$ | 21,18 | 80,183 | 0,500 | 6,823 | 26,34 | 1,6  | 7,403 | $\frac{3^+}{2}$ | $\frac{1^+}{2}$ | +0,6908 | —      | -0,12  | 0     | $^{131}\text{I}$ ( $\beta^-$ , 8,05 сут)                                                              |
| $^{133}\text{Cs}$ | 100   | 80,997 | 6,313 | 0,535 | 26,48 | 1,72 | 10,28 | $\frac{7^+}{2}$ | $\frac{5^+}{2}$ | -2,5786 | +3,44  | -0,003 | —     | $^{133}\text{Ba}$ ( $\alpha$ , 3, 10,5 лет),<br>$^{133}\text{Xe}$ ( $\beta^-$ , 5,29 сут)             |
| $^{133}\text{Ba}$ | 0     | 12,29  | 8,10  | 2,748 | 0,610 | —    | 29,18 | $\frac{1^+}{2}$ | $\frac{3^+}{2}$ | —       | —      | 0      | —     | $^{133m}\text{Ba}$ (38,9 ч)                                                                           |
| $^{139}\text{La}$ | 99,91 | 165,85 | 1,50  | 1,100 | 106,2 | 0,26 | 5,282 | $\frac{7^+}{2}$ | $\frac{5^+}{2}$ | +2,7781 | —      | +0,21  | —     | $^{139}\text{Ba}$ ( $\beta^-$ , 84,9 мин),<br>$^{139}\text{Ce}$ ( $\alpha$ , 3, 140 сут)              |
| $^{141}\text{Pr}$ | 100   | 145,42 | 1,85  | 1,017 | 80,50 | 0,46 | 10,57 | $\frac{5^+}{2}$ | $\frac{7^+}{2}$ | +4,162  | +2,80  | -0,059 | +0,3  | $^{141}\text{Ce}$ ( $\beta^-$ , 32,5 сут),<br>$^{141}\text{Nd}$ ( $\alpha$ , 3, 2,5 ч)                |
| $^{145}\text{Nd}$ | 8,30  | 67,25  | 29,4  | 0,138 | 16,74 | 6,1  | 3,810 | $\frac{7^-}{2}$ | $\frac{3^-}{2}$ | -0,654  | -0,320 | -0,254 | —     | $^{145}\text{Pm}$ ( $\alpha$ , 3, 17,7 года),<br>$^{145}\text{Pr}$ ( $\beta^-$ , 5,98 ч)              |
| $^{145}\text{Nd}$ | 8,30  | 72,50  | 0,72  | 5,241 | 19,46 | 4,9  | 5,917 | $\frac{7^-}{2}$ | $\frac{5^-}{2}$ | -0,654  | -0,32  | -0,254 | —     | —                                                                                                     |
| $^{145}\text{Pm}$ | 0     | 61,25  | 2,62  | 1,705 | 13,89 | 6,42 | 11,72 | $\frac{5^+}{2}$ | $\frac{7^+}{2}$ | —       | —      | —      | —     | $^{145}\text{Sm}$ ( $\alpha$ , 3, 340 сут)                                                            |
| $^{147}\text{Pm}$ | 0     | 91,03  | 2,57  | 1,169 | 30,26 | —    | 6,920 | $\frac{7^+}{2}$ | $\frac{5^+}{2}$ | +2,62   | +3,60  | +0,71  | +0,6  | $^{147}\text{Nd}$ ( $\beta^-$ , 11,1 сут)                                                             |
| $^{147}\text{Sm}$ | 14,97 | 122,1  | 0,80  | 2,801 | 54,44 | —    | 6,154 | $\frac{7}{2}$   | $\frac{5}{2}$   | —       | —      | —      | —     | —                                                                                                     |
| $^{149}\text{Sm}$ | 13,83 | 22,494 | 7,12  | 1,708 | 1,823 | 50   | 7,111 | $\frac{7^-}{2}$ | $\frac{5^-}{2}$ | -0,670  | -0,623 | +0,058 | +0,50 | $^{149}\text{Eu}$ ( $\alpha$ , 3, 93 сут),<br>$^{149}\text{Pm}$ ( $\beta^-$ , 53 ч)                   |
| $^{151}\text{Sm}$ | 0     | 65,83  | 20    | 0,208 | 15,40 | —    | 8,352 | —               | —               | —       | —      | —      | —     | —                                                                                                     |
| $^{152}\text{Sm}$ | 26,72 | 121,78 | 1,41  | 1,593 | 52,37 | 1,17 | 38,01 | $0^+$           | $2^+$           | 0       | +0,58  | 0      | -1,6  | $^{152}\text{Eu}$ ( $\alpha$ , 3, 12 лет),<br>$^{152}\text{Pm}$ ( $\beta^-$ , 6 мес)                  |
| $^{153}\text{Sm}$ | 0     | 35,842 | 2,0   | 3,816 | 4,507 | —    | 146,5 | $\frac{3}{2}$   | $\frac{3}{2}$   | —       | —      | —      | —     | —                                                                                                     |
| $^{154}\text{Sm}$ | 22,71 | 81,99  | 3,0   | 1,112 | 23,43 | —    | 30,08 | $0^+$           | $2^+$           | 0       | -0,79  | 0      | —     | Кулоновское возбуждение                                                                               |



| Ядро              | Содержа-<br>ние, % | $E$ , кэВ | $T_{1/2}$ , нс | $\Gamma$ , мм/с     | $E_R$ ,<br>$10^{-3}$ эВ | $\tau_T$ | $10^{-20}$ см <sup>2</sup> | $I_g$               | $I_e$               | $\mu_g$ | $\mu_e$ | $Q_{g'}$ ,<br>$10^{-24}$ см <sup>2</sup> | $Q_{e'}$ ,<br>$10^{-24}$ см <sup>2</sup> | Сведения о материнском ядре                                                       |
|-------------------|--------------------|-----------|----------------|---------------------|-------------------------|----------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------|---------|------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <sup>151</sup> Eu | 47,82              | 21,532    | 9,7            | 1,310               | 1,648                   | 28,6     | 23,77                      | $5^+ \frac{7^+}{2}$ | $7^+ \frac{7^+}{2}$ | +3,465  | +2,587  | +1,14                                    | +1,49                                    | <sup>151</sup> Gd (э. з., 120 сут),<br><sup>152</sup> Sm ( $\beta^-$ , 90 лет)    |
| <sup>153</sup> Eu | 52,18              | 83,365    | 0,82           | 4,002               | 24,38                   | 3,82     | 9,738                      | $5^+ \frac{7^-}{2}$ | $7^- \frac{7^-}{2}$ | +1,5249 | +1,80   | +2,8                                     | —                                        | <sup>153</sup> Sm ( $\beta^-$ , 46,7 ч),<br><sup>153</sup> Gd (э. з., 242 сут)    |
| <sup>155</sup> Eu | 52,18              | 97,429    | 0,21           | 13,37               | 33,30                   | 0,42     | 17,97                      | $5^+ \frac{5^-}{2}$ | $5^- \frac{5^-}{2}$ | +1,5249 | +0,793  | +2,9                                     | —                                        | —                                                                                 |
| <sup>153</sup> Eu | 52,18              | 103,18    | 3,9            | 0,680               | 37,35                   | 1,78     | 5,456                      | $5^+ \frac{3^+}{2}$ | $3^+ \frac{3^+}{2}$ | +1,5249 | +2,04   | +2,9                                     | +1,5                                     | —                                                                                 |
| <sup>154</sup> Gd | 2,15               | 123,07    | 1,17           | 1,900               | 52,79                   | 1,2      | 36,71                      | $0^+ \frac{2^+}{2}$ | $2^+ \frac{2^+}{2}$ | 0       | 0,85    | 0                                        | —                                        | <sup>154</sup> Eu ( $\beta^-$ , 16 лет)                                           |
| <sup>155</sup> Gd | 14,73              | 60,01     | 0,194          | 23,49               | 12,47                   | 8,72     | 10,48                      | $3^- \frac{5^-}{2}$ | $5^- \frac{5^-}{2}$ | -0,2584 | —       | +1,6                                     | —                                        | <sup>155</sup> Eu ( $\beta^-$ , 4,96 года),<br><sup>155</sup> Tb (э. з., 5,6 сут) |
| <sup>155</sup> Gd | 14,73              | 86,545    | 6,33           | 0,499               | 25,94                   | 0,43     | 33,92                      | $3^- \frac{5^+}{2}$ | $5^+ \frac{5^+}{2}$ | -0,2584 | -0,528  | +1,6                                     | +0,32                                    | —                                                                                 |
| <sup>155</sup> Gd | 14,73              | 105,31    | 1,168          | 2,224               | 38,41                   | 0,26     | 16,46                      | $3^- \frac{3^+}{2}$ | $3^+ \frac{3^+}{2}$ | -0,2584 | —       | +1,6                                     | +1,6                                     | —                                                                                 |
| <sup>156</sup> Gd | 20,47              | 88,966    | 2,17           | 1,417               | 27,23                   | 3,9      | 31,35                      | $0^+ \frac{2^+}{2}$ | $2^+ \frac{2^+}{2}$ | 0       | +0,778  | 0                                        | -2,1                                     | <sup>156</sup> Eu ( $\beta^-$ , 15 сут),<br><sup>156</sup> Tb (э. з., 5,4 сут)    |
| <sup>157</sup> Gd | 15,68              | 54,54     | 0,187          | 26,82               | 10,17                   | 11,9     | 9,586                      | $3^- \frac{5^-}{2}$ | $5^- \frac{5^-}{2}$ | -0,3388 | -0,513  | 2,0                                      | 3,6                                      | <sup>157</sup> Eu ( $\beta^-$ , 15,2 ч)                                           |
| <sup>157</sup> Gd | 15,68              | 64,0      | 460            | $9,3 \cdot 10^{-3}$ | 14,00                   | 0,97     | 23,19                      | $3^- \frac{5^+}{2}$ | $5^+ \frac{5^+}{2}$ | -0,3388 | -0,513  | 2,0                                      | 3,6                                      | —                                                                                 |
| <sup>158</sup> Gd | 24,87              | 79,51     | 2,54           | 1,355               | 21,48                   | —        | 27,56                      | $0^+ \frac{2^+}{2}$ | $2^+ \frac{2^+}{2}$ | 0       | +0,77   | 0                                        | +1,5                                     | <sup>157</sup> Gd (n, $\gamma$ )                                                  |
| <sup>160</sup> Gd | 21,90              | 75,26     | 2,7            | 1,346               | 19,00                   | —        | 25,65                      | $0^+ \frac{2^+}{2}$ | $2^+ \frac{2^+}{2}$ | 0       | +0,61   | 0                                        | +1,6                                     | —                                                                                 |
| <sup>159</sup> Tb | 100                | 57,995    | 0,105          | 44,92               | 11,35                   | 9,36     | 10,53                      | $3^+ \frac{5^+}{2}$ | $5^+ \frac{5^+}{2}$ | +2,008  | +1,606  | +1,3                                     | —                                        | <sup>159</sup> Gd ( $\beta^-$ , 18,6 ч),<br><sup>160</sup> Dy (э. з., 144,4 сут)  |
| <sup>160</sup> Dy | 2,29               | 86,788    | 2,037          | 1,547               | 25,27                   | 4,5      | 29,42                      | $0^+ \frac{2^+}{2}$ | $2^+ \frac{2^+}{2}$ | 0       | +0,724  | 0                                        | 1,7                                      | <sup>160</sup> Tb ( $\beta^-$ , 72,1 сут)                                         |
| <sup>161</sup> Dy | 18,88              | 25,655    | 28,2           | 0,378               | 2,194                   | 2,9      | 95,31                      | $5^+ \frac{7^-}{2}$ | $7^- \frac{7^-}{2}$ | -0,479  | +0,584  | +2,3                                     | +2,3                                     | <sup>161</sup> Tb ( $\beta^-$ , 6,9 сут),<br><sup>161</sup> Ho (э. з., 2,45 ч)    |
| <sup>161</sup> Dy | 18,88              | 43,83     | 0,78           | 8,002               | 6,405                   | 4,32     | 31,92                      | $5^+ \frac{7^+}{2}$ | $7^+ \frac{7^+}{2}$ | -0,479  | -0,140  | +2,35                                    | +0,5                                     | —                                                                                 |
| <sup>161</sup> Dy | 18,88              | 74,577    | 3,31           | 1,108               | 18,54                   | 0,65     | 6,754                      | $5^+ \frac{3^-}{2}$ | $3^- \frac{3^-}{2}$ | -0,479  | -0,391  | +2,3                                     | +1,4                                     | —                                                                                 |
| <sup>162</sup> Dy | 25,53              | 80,65     | 2,27           | 1,494               | 21,55                   | —        | 121,3                      | $0^+ \frac{2^+}{2}$ | $2^+ \frac{2^+}{2}$ | 0       | +0,74   | 0                                        | —                                        | <sup>161</sup> Dy (n, $\gamma$ )                                                  |

|                   |       |        |       |        |       |      |       |                     |                     |         |        |       |       |                                                                                         |
|-------------------|-------|--------|-------|--------|-------|------|-------|---------------------|---------------------|---------|--------|-------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $^{164}\text{Dy}$ | 28,18 | 73,392 | 2,39  | 1,560  | 17,63 | —    | 22,05 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,84  | 0     | -1,12 | $^{164}\text{Ho}$ (э. з., 37 мин)                                                       |
| $^{165}\text{Ho}$ | 100   | 94,699 | 0,022 | 130,1  | 29,17 | 3,1  | 8,277 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | +4,12   | +4,12  | +2,4  | +2,6  | $^{165}\text{Dy}$ ( $\beta^-$ , 2,33 ч)                                                 |
| $^{164}\text{Er}$ | 1,56  | 91,39  | 1,47  | 2,036  | 27,34 | —    | 28,27 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,7   | 0     | —     | $^{164}\text{Ho}$ ( $\beta^-$ , 37 мин)                                                 |
| $^{166}\text{Er}$ | 33,41 | 80,557 | 1,87  | 1,816  | 20,98 | 6,93 | 23,77 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,63  | 0     | -1,6  | $^{166}\text{Ho}$ ( $\beta^-$ , 26,9 ч),<br>$^{166}\text{Tm}$ (э. з., 7,7 ч)            |
| $^{167}\text{Er}$ | 22,94 | 79,322 | 0,119 | 29,0   | 20,22 | 5,74 | 7,211 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0,564   | —      | 2,83  | —     | $^{167}\text{Tm}$ (э. з., 9,6 сут),<br>$^{167}\text{Ho}$ ( $\beta^-$ , 3,1 ч)           |
| $^{168}\text{Er}$ | 27,07 | 79,80  | 1,88  | 1,823  | 20,35 | —    | 23,60 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,66  | 0     | —     | $^{168}\text{Tm}$ (э. з., 85 сут)                                                       |
| $^{170}\text{Er}$ | 14,88 | 79,31  | 1,9   | 1,815  | 19,86 | —    | 23,35 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,62  | 0     | —     | Кулоновское возбуждение                                                                 |
| $^{169}\text{Tm}$ | 100   | 8,401  | 4,0   | 8,141  | 0,224 | 291  | 23,74 | $1^+ \frac{7^-}{2}$ | $3^+ \frac{9^-}{2}$ | -0,231  | +0,534 | 0     | -1,2  | $^{169}\text{Er}$ ( $\beta^-$ , 9,4 сут),<br>$^{169}\text{Yb}$ (э. з., 32 сут)          |
| $^{170}\text{Yb}$ | 3,03  | 84,253 | 1,608 | 2,019  | 22,41 | 6,12 | 24,20 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,67  | 0     | -2,1  | $^{170}\text{Tm}$ ( $\beta^-$ , 128,6 сут),<br>$^{170}\text{Lu}$ ( $\beta^+$ , 2,0 сут) |
| $^{171}\text{Yb}$ | 14,31 | 66,719 | 0,87  | 4,713  | 13,97 | 13   | 7,852 | $1^- \frac{7^-}{2}$ | $3^- \frac{9^-}{2}$ | +0,4919 | +0,348 | 0     | -1,59 | $^{171}\text{Tm}$ ( $\beta^-$ , 1,92 года),<br>$^{171}\text{Lu}$ (э. з., 8,2 сут)       |
| $^{172}\text{Yb}$ | 14,31 | 75,875 | 1,64  | 2,198  | 18,07 | 7,8  | 14,44 | $1^- \frac{7^-}{2}$ | $5^- \frac{9^-}{2}$ | +0,4919 | +1,008 | 0     | -2,21 | —                                                                                       |
| $^{172}\text{Yb}$ | 21,82 | 78,69  | 1,80  | 1,931  | 19,32 | 8,5  | 20,79 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,664 | 0     | -2,16 | $^{172}\text{Lu}$ (э. з., 6,7 сут),<br>$^{172}\text{Tm}$ ( $\beta^-$ , 63,6 ч)          |
| $^{174}\text{Yb}$ | 31,84 | 76,469 | 1,76  | 2,033  | 18,04 | 9,4  | 20,10 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,672 | 0     | -2,14 | $^{174}\text{Lu}$ (э. з., 3,6 года),<br>$^{174m}\text{Tm}$ ( $\beta^-$ , 5,2 мин)       |
| $^{176}\text{Yb}$ | 12,73 | 82,13  | 2,0   | 1,665  | 20,57 | 7,1  | 22,47 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,74  | 0     | -2,24 | Кулоновское возбуждение                                                                 |
| $^{175}\text{Lu}$ | 97,41 | 113,80 | 0,100 | 24,04  | 39,72 | 2,51 | 6,728 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | +2,22   | +4,26  | +5,68 | —     | $^{175}\text{Yb}$ ( $\beta^-$ , 4,19 сут),<br>$^{175}\text{Hf}$ (э. з., 70 сут)         |
| $^{176}\text{Hf}$ | 5,20  | 88,361 | 1,39  | 2,227  | 23,81 | —    | 22,84 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | —      | 0     | —     | $^{176m}\text{Lu}$ ( $\beta^-$ , 3,7 ч)                                                 |
| $^{177}\text{Hf}$ | 18,50 | 112,97 | 0,5   | 4,843  | 38,70 | —    | 5,991 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | +0,61   | +1,0   | —     | —     | $^{177}\text{Lu}$ ( $\beta^-$ , 6,7 сут)                                                |
| $^{178}\text{Hf}$ | 27,14 | 93,174 | 1,495 | 1,964  | 26,18 | 4,6  | 25,16 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,52  | 0     | -1,95 | $^{178}\text{Lu}$ ( $\beta^-$ , 28,4 мин),<br>$^{178}\text{Ta}$ (э. з., 9,31 мин)       |
| $^{180}\text{Hf}$ | 35,24 | 93,332 | 1,50  | 1,954  | 25,98 | 4,7  | 24,59 | $0^+ \frac{7^-}{2}$ | $2^+ \frac{9^-}{2}$ | 0       | +0,63  | 0     | -1,96 | $^{180m}\text{Ta}$ (э. з., 8,1 ч),<br>$^{180m}\text{Hf}$ (140 сут)                      |
| $^{181}\text{Ta}$ | 99,99 | 6,238  | 6800  | 0,0064 | 0,115 | 80   | 94,69 | $7^+ \frac{7^-}{2}$ | $9^- \frac{9^-}{2}$ | +2,356  | +5,14  | +3,9  | +4,4  | $^{181}\text{W}$ (э. з., 121,2 сут),<br>$^{181}\text{Hf}$ ( $\beta^-$ , 42,4 сут)       |
| $^{181}\text{Ta}$ | 99,99 | 136,25 | 0,040 | 50,19  | 55,05 | 1,76 | 5,969 | $7^+ \frac{7^-}{2}$ | $9^- \frac{9^-}{2}$ | +2,356  | —      | +3,9  | —     | —                                                                                       |

| Ядро              | Содержа-<br>ние, % | $T_{1/2}$ , ис | $\Gamma$ , кЭВ | $\Gamma$ , мм/с | $E_R$ ,<br>$10^{-3}$ эВ | $\alpha_T$ | $\sigma_0$ ,<br>$10^{-27}$ см <sup>2</sup> | $I_g$             | $I_r$             | $\mu_g$ | $\mu_r$ | $Q_{\beta^-}$ ,<br>$10^{-24}$ см <sup>2</sup> | $Q_{\beta^+}$ ,<br>$10^{-24}$ см <sup>2</sup> | Сведения о материнском ядре                                                            |
|-------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------------|------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <sup>180</sup> W  | 0,14               | 1,27           | 103,70         | 2,077           | 32,07                   | 3,4        | 25,62                                      | 0 <sup>+</sup>    | 2 <sup>+</sup>    | 0       | +0,52   | 0                                             | 0                                             | <sup>180m</sup> Ta ( $\beta^-$ , 8,1 ч),<br><sup>180</sup> Re ( $\beta^-$ , 2,43 мин)  |
| <sup>182</sup> W  | 26,41              | 1,31           | 100,10         | 2,086           | 29,55                   | 3,85       | 25,17                                      | 0 <sup>+</sup>    | 2 <sup>+</sup>    | 0       | +0,51   | 0                                             | 0                                             | <sup>182</sup> Ta ( $\beta^-$ , 115 сут)                                               |
| <sup>183</sup> W  | 14,40              | 0,184          | 46,484         | 31,98           | 6,338                   | 40         | 5,523                                      | $1^- \frac{1}{2}$ | $3^- \frac{1}{2}$ | +0,12   | -0,10   | 0                                             | 0                                             | <sup>183</sup> Ta ( $\beta^-$ , 5,1 сут),<br><sup>183</sup> Re ( $\beta^-$ , 71 сут)   |
| <sup>185</sup> W  | 14,40              | 0,688          | 99,079         | 4,013           | 28,79                   | 4,1        | 8,178                                      | $1^- \frac{1}{2}$ | $5^- \frac{1}{2}$ | +0,12   | +0,92   | 0                                             | 0                                             | —                                                                                      |
| <sup>184</sup> W  | 30,64              | 1,28           | 111,21         | 1,922           | 36,08                   | 2,6        | 27,40                                      | 0 <sup>+</sup>    | 2 <sup>+</sup>    | 0       | +0,58   | 0                                             | 0                                             | <sup>184</sup> Re ( $\beta^-$ , 38 сут),<br><sup>184</sup> Ta ( $\beta^-$ , 8,7 ч)     |
| <sup>186</sup> W  | 28,41              | 1,01           | 122,30         | 2,215           | 43,17                   | 1,6        | 31,46                                      | 0 <sup>+</sup>    | 2 <sup>+</sup>    | 0       | +0,634  | 0                                             | 0                                             | <sup>186</sup> Re ( $\beta^-$ , 90 ч),<br><sup>186</sup> Ta ( $\beta^-$ , 10 мин)      |
| <sup>187</sup> Re | 62,93              | 0,010          | 134,24         | 203,8           | 51,73                   | 2,266      | 5,542                                      | $5^+ \frac{1}{2}$ | $7^+ \frac{1}{2}$ | +3,200  | —       | +2,2                                          | —                                             | <sup>187</sup> W ( $\beta^-$ , 23,9 ч)                                                 |
| <sup>186</sup> Os | 1,59               | 0,84           | 137,16         | 2,374           | 54,29                   | 1,3        | 28,40                                      | 0 <sup>+</sup>    | 2 <sup>+</sup>    | 0       | +0,56   | 0                                             | 0                                             | <sup>186</sup> Re ( $\beta^-$ , 90 ч)                                                  |
| <sup>188</sup> Os | 13,30              | 0,695          | 155,03         | 2,539           | 68,62                   | 0,8        | 27,96                                      | 0 <sup>+</sup>    | 2 <sup>+</sup>    | 0       | +0,58   | 0                                             | 0                                             | <sup>188</sup> Re ( $\beta^-$ , 16,8 ч),<br><sup>188</sup> Ir ( $\beta^-$ , 3,41 ч)    |
| <sup>188</sup> Os | 16,10              | 0,50           | 36,22          | 15,11           | 3,726                   | 80         | 1,151                                      | $3^- \frac{1}{2}$ | $1^- \frac{1}{2}$ | +0,6565 | +0,22   | +0,94                                         | 0                                             | <sup>188</sup> Ir ( $\beta^-$ , 13,3 сут),<br><sup>188</sup> Re ( $\beta^-$ , 24,3 ч)  |
| <sup>186</sup> Os | 16,10              | 1,64           | 69,59          | 2,397           | 13,75                   | 8,0        | 8,420                                      | $3^- \frac{1}{2}$ | $5^- \frac{1}{2}$ | +0,6565 | +0,98   | +0,94                                         | +0,62                                         | —                                                                                      |
| <sup>189</sup> Os | 16,10              | 0,23           | 95,23          | 12,49           | 25,76                   | 6,7        | 0,561                                      | $3^- \frac{1}{2}$ | $3^- \frac{1}{2}$ | +0,6565 | —       | +0,94                                         | 0                                             | —                                                                                      |
| <sup>190</sup> Os | 26,40              | 0,47           | 186,90         | 3,114           | 98,69                   | 0,4        | 24,66                                      | 0 <sup>+</sup>    | 2 <sup>+</sup>    | 0       | +0,63   | 0                                             | 0                                             | <sup>190</sup> Ir ( $\beta^-$ , 12,1 сут),<br><sup>190</sup> Re ( $\beta^-$ , 3,1 мин) |
| <sup>191</sup> Ir | 37,30              | 4,02           | 82,398         | 0,826           | 19,08                   | 10,7       | 1,540                                      | $3^+ \frac{1}{2}$ | $1^+ \frac{1}{2}$ | +0,1453 | +0,54   | +0,78                                         | 0                                             | <sup>191</sup> Os ( $\beta^-$ , 15,4 сут),<br><sup>191</sup> Pt ( $\beta^-$ , 2,8 сут) |
| <sup>191</sup> Ir | 37,30              | 0,089          | 129,40         | 23,75           | 47,06                   | 2,88       | 5,649                                      | $3^+ \frac{1}{2}$ | $5^- \frac{1}{2}$ | +0,1453 | +0,55   | +0,78                                         | —                                             | —                                                                                      |

|                   |        |        |       |       |       |       |       |                 |                 |         |        |       |       |                                                                                            |
|-------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|---------|--------|-------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $^{193}\text{Ir}$ | 62,70  | 73,039 | 6,30  | 0,594 | 14,84 | 6,5   | 3,057 | $\frac{3^+}{2}$ | $\frac{1^+}{2}$ | +0,1583 | +0,486 | +0,7  | 0     | $^{193}\text{Os}$ ( $\beta^-$ , 30,0 ч)                                                    |
| $^{191}\text{Ir}$ | 62,70  | 138,95 | 0,080 | 24,61 | 54,00 | 2,26  | 5,831 | $\frac{3^+}{2}$ | $\frac{5^-}{2}$ | +0,1583 | —      | +0,7  | —     | —                                                                                          |
| $^{195}\text{Pt}$ | 33,80  | 98,857 | 0,170 | 16,28 | 26,90 | 7,2   | 6,106 | $\frac{1^-}{2}$ | $\frac{3^-}{2}$ | +0,6060 | -0,62  | 0     | —     | $^{195}\text{Au}$ ( $\alpha$ , 3., 183 сут),<br>$^{195}\text{Ir}$ ( $\beta^-$ , 2,8 ч)     |
| $^{195}\text{Pt}$ | 33,80  | 129,74 | 0,620 | 3,401 | 46,33 | 1,8   | 7,426 | $\frac{1^-}{2}$ | $\frac{5^-}{2}$ | +0,6060 | +0,90  | 0     | —     | —                                                                                          |
| $^{197}\text{Au}$ | 100    | 77,345 | 1,879 | 1,883 | 16,30 | 4,30  | 3,858 | $\frac{3^+}{2}$ | $\frac{1^+}{2}$ | +0,1448 | +0,418 | +0,59 | 0     | $^{197}\text{Pt}$ ( $\beta^-$ , 18,3 ч),<br>$^{197}\text{Hg}$ ( $\alpha$ , 3., 64,1 ч)     |
| $^{199}\text{Hg}$ | 16,84  | 158,37 | 2,47  | 0,699 | 67,65 | 0,94  | 15,08 | $\frac{1^-}{2}$ | $\frac{5^-}{2}$ | +0,506  | +1,28  | 0     | +0,7  | $^{199}\text{Au}$ ( $\beta^-$ , 3,14 сут),<br>$^{199}\text{Tl}$ ( $\alpha$ , 3., 7,42 ч)   |
| $^{201}\text{Hg}$ | 13,22  | 32,19  | 0,20  | 42,49 | 2,767 | —     | 0,948 | $\frac{3^-}{2}$ | $\frac{1^-}{2}$ | —       | —      | —     | 0     | $^{201}\text{Tl}$ ( $\alpha$ , 3., 73 ч)                                                   |
| $^{232}\text{Th}$ | 0      | 49,369 | 0,345 | 16,06 | 5,639 | 319   | 1,568 | $0^+$           | $2^+$           | —       | —      | —     | —     | $^{232}\text{U}$ ( $\alpha$ , $2,4 \cdot 10^7$ лет)                                        |
| $^{231}\text{Pa}$ | 0      | 84,24  | 41,0  | 0,079 | 16,49 | 1,83  | 4,751 | $\frac{3^-}{2}$ | $\frac{5^-}{2}$ | +1,98   | —      | -1,7  | +0,8  | $^{231}\text{Th}$ ( $\beta^-$ , 25,5 ч)                                                    |
| $^{234}\text{U}$  | 0,0057 | 43,491 | 0,266 | 23,65 | 4,339 | 780   | 0,828 | $0^+$           | $2^+$           | —       | —      | —     | -2,39 | $^{234m}\text{Pa}$ ( $\beta^-$ , 1,17 мин),<br>$^{234}\text{Np}$ ( $\alpha$ , 3., 4,4 сут) |
| $^{238}\text{U}$  | 0      | 45,242 | 0,235 | 25,73 | 4,655 | 845   | 0,706 | $0^+$           | $2^+$           | —       | —      | —     | 2,96  | $^{238}\text{Np}$ ( $\alpha$ , 3., 22 ч)                                                   |
| $^{238}\text{U}$  | 99,27  | 44,915 | 0,225 | 27,07 | 4,550 | 660   | 0,917 | $0^+$           | $2^+$           | —       | +0,25  | +10,5 | -3,2  | $^{242}\text{Pu}$ ( $\alpha$ , $3,79 \cdot 10^5$ лет)                                      |
| $^{237}\text{Np}$ | 0      | 59,537 | 68,3  | 0,067 | 8,028 | 1,12  | 30,60 | $\frac{5^+}{2}$ | $\frac{5^-}{2}$ | +2,5    | +1,3   | +4,1  | +4,1  | $^{241}\text{Am}$ ( $\alpha$ , 458 лет),<br>$^{237}\text{Pu}$ ( $\alpha$ , 3., 44,63 сут)  |
| $^{239}\text{Pu}$ | 0      | 57,26  | 0,101 | 47,30 | 7,364 | 223   | 0,770 | $\frac{1^+}{2}$ | $\frac{5^+}{2}$ | +0,200  | —      | —     | —     | $^{243}\text{Cm}$ ( $\alpha$ , 30 лет),<br>$^{239}\text{Np}$ ( $\beta^-$ , 2,36 сут)       |
| $^{240}\text{Pu}$ | 0      | 42,824 | 0,162 | 39,00 | 4,100 | 920   | 0,724 | $0^+$           | $2^+$           | —       | +0,78  | —     | -3,3  | $^{244}\text{Cm}$ ( $\alpha$ , 18,1 года),<br>$^{240}\text{Np}$ ( $\beta^-$ , 63 мин)      |
| $^{243}\text{Am}$ | 0      | 84,0   | 2,34  | 1,392 | 15,59 | 0,218 | 27,61 | $\frac{5^-}{2}$ | $\frac{5^+}{2}$ | +1,58   | —      | +4,9  | +4,9  | $^{243}\text{Pu}$ ( $\beta^-$ , 4,96 ч),<br>$^{247}\text{Bk}$ ( $\alpha$ , 2,34 нс)        |

### 38.3. ПАРАМЕТРЫ МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ

В табл. 38.2 приведены для температур 298 и 4,2 К положения линий (мм/с) спектра  $\alpha$ -Fe относительно

источника  $\text{Pd}^{57}\text{Co}$  при температуре 298К, а также параметры  $\delta$ , мм/с,  $B_n$ , Тл [10], на рис. 38.1 — мёссбауэровские спектры поглощения для ядер  $^{57}\text{Fe}$  в различных материалах.

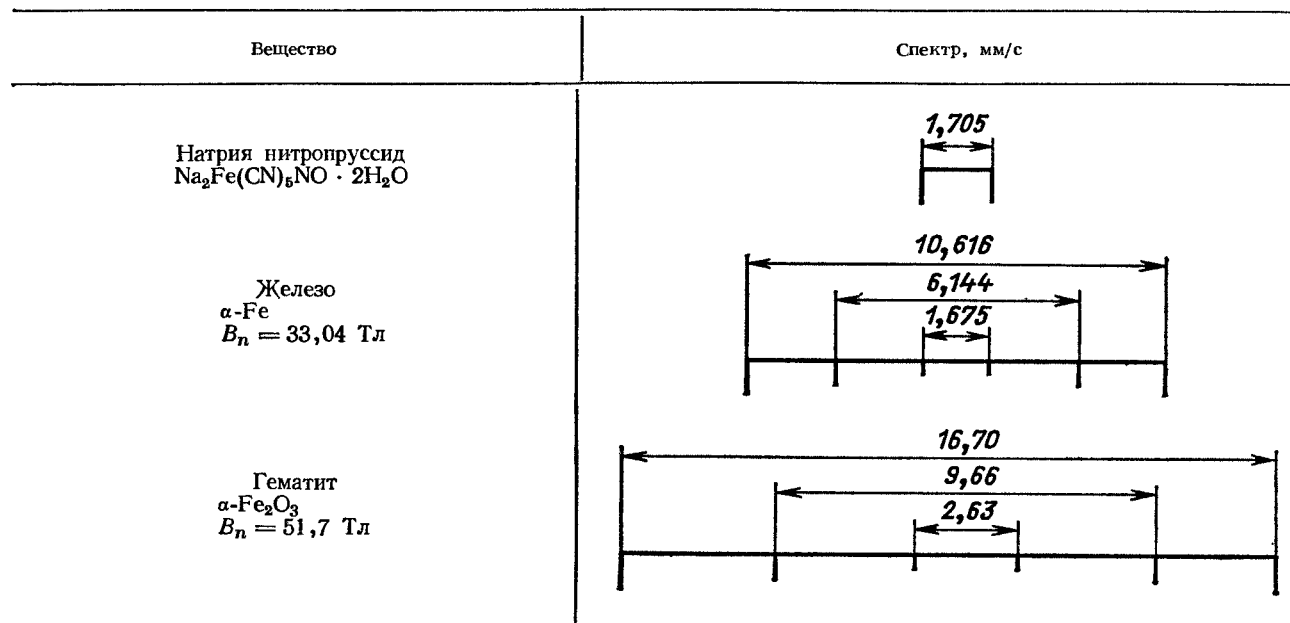


Рис. 38.1. Схематическое изображение мёссбауэровских спектров поглощения для ядер  $^{57}\text{Fe}$  при температуре 300 К в различных материалах, используемых в качестве эталонных образцов для градуировки спектрометров [8]

В табл. 38.3 приведены следующие характеристики: формула химического соединения (сплава), содержащего мёссбауэровские ядра в стабильном состоянии (поглотитель);

$T_A$  — температура поглотителя (если не указана, то наиболее вероятна температура 25 °С);

формула химического соединения (сплава), содержащего радиоактивные материнские ядра, или химический символ матрицы, в которую введены атомы материнского изотопа (источник);

$T_S$  — температура источника;

$\Gamma$  — ширина отдельной линии экспериментально наблюдаемого мёссбауэровского спектра;

$\epsilon$  — максимальный эффект поглощения, определяемый по формуле  $\epsilon = [N(\infty) - N(v_0)]/N(\infty)$ ; если  $\epsilon$  приводится с учетом фона от постороннего излучения, рядом с цифрой стоит индекс 0;

$\delta$  — сдвиг наблюдаемого спектра, отсчитываемый от значения  $v=0$ ;  $\delta$  считается положительным в случае движения источника и поглотителя навстречу друг другу (если знак  $\delta$  не указан, наиболее вероятным считается положительное значение);

$\Delta$  — квадрупольное расщепление;

$B_n$  — индукция магнитного поля, действующего на ядре атомов мёссбауэровского изотопа в данном веществе (поглотителе);

$f_S, f_A$  — вероятности излучения и поглощения  $\gamma$ -квантов без отдачи энергии.

В табл. 38.4 приведены основные параметры мёссбауэровских спектров ядер  $^{237}\text{Np}$  в некоторых веществах [11].

Таблица 38.2. Положения линий спектра  $\alpha$ -Fe для гелиевой температуры и  $t = 25$  °С  
Источник — кобальт в матрице палладия при температуре 25 °С

| T, К | Номер линии и ее положение в спектре, мм/с |        |        |       |       |       | $\delta$ , мм/с | $B_n$ , Тл |
|------|--------------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-----------------|------------|
|      | 1                                          | 2      | 3      | 4     | 5     | 6     |                 |            |
| 298  | —5,482                                     | —3,247 | —1,013 | 0,662 | 2,897 | 5,134 | —0,175          | —330,4     |
| 4,2  | —5,501                                     | —3,210 | —0,917 | 0,801 | 3,095 | 5,394 | —0,056          | —339,0     |

Таблица 38.3. Значения параметров мёссбауэровских спектров

| Поглотитель                                                    |           | Источник                                       |           | $\Gamma$ , мм/с | $\epsilon$ , %   | $\delta$ , мм/с | $\Delta$ , мм/с | $B_{n'}$ , Тл | $f_S$ | $f_A$ |
|----------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------|-----------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|-------|-------|
| Формула                                                        | $T_A$ , К | Формула                                        | $T_S$ , К |                 |                  |                 |                 |               |       |       |
| KCl                                                            | 4,2       | KCl ( $\alpha$ , $p$ )                         | 4,2       | 11              | 16               | -0,14           | —               | —             | —     | —     |
| Fe                                                             | 4,2       | Cu(Co)                                         | 4,2       | 0,20            | 36               | -0,226          | —               | 33,0          | —     | —     |
| Fe                                                             | 4,2       | Pd(Co)                                         | 4,2       | —               | —                | -0,185          | —               | —             | —     | —     |
| Fe                                                             | 298       | Pt(Co)                                         | 298       | 0,22            | 10 <sub>0</sub>  | -0,347          | —               | —             | —     | —     |
| Fe                                                             | 300       | Нержавеющая сталь 310 (Co)                     | 300       | 0,39            | 16 <sub>0</sub>  | +0,090          | —               | —             | —     | —     |
| Нержавеющая сталь 310                                          | 300       | Cr(Co)                                         | 300       | 0,48            | 21               | +0,05           | —               | —             | —     | —     |
| Нержавеющая сталь 310                                          | 300       | Cu(Co)                                         | 300       | 0,45            | 45 <sub>0</sub>  | -0,32           | —               | —             | —     | —     |
| Нержавеющая сталь 310                                          | 300       | Au(Co)                                         | 300       | 0,48            | —                | -0,78           | —               | —             | 0,67  | —     |
| Нержавеющая сталь 310                                          | 300       | UO <sub>2</sub> (Co)                           | 300       | —               | —                | 0,32            | —               | —             | —     | —     |
| Нержавеющая сталь 310                                          | 300       | Нержавеющая сталь 310 (Co)                     | 300       | 0,53            | 47 <sub>0</sub>  | —               | —               | —             | —     | —     |
| $\alpha$ -F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                        | 300       | Cr(Co)                                         | 300       | 0,40            | —                | +0,51           | 0,40            | 51,7          | —     | —     |
| $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       | 300       | Нержавеющая сталь 310 (Co)                     | 300       | —               | —                | +0,47           | 0,40            | —             | —     | —     |
| KFeS <sub>2</sub>                                              | 298       | Pd(Co)                                         | 298       | 0,28            | 18 <sub>0</sub>  | -0,01           | 0,50            | —             | —     | —     |
| Na <sub>2</sub> Fe(CN) <sub>5</sub> NO · 2H <sub>2</sub> O     | 296       | Cu(Co)                                         | 296       | —               | —                | -0,484          | 1,705           | —             | —     | —     |
| Na <sub>2</sub> Fe(CN) <sub>5</sub> NO · 2H <sub>2</sub> O     | 296       | Pt(Co)                                         | 300       | 0,26            | 21               | -0,61           | 1,712           | —             | —     | —     |
| Na <sub>2</sub> Fe(CN) <sub>5</sub> NO · 2H <sub>2</sub> O     | 300       | Нержавеющая сталь 310 (Co)                     | 300       | 0,38            | 13 <sub>0</sub>  | -0,17           | 1,712           | —             | —     | —     |
| Ni                                                             | 80        | Ni (кулоновское возбуждение)                   | 80        | 3,3             | 4                | —               | —               | —             | 0,09  | 0,09  |
| Ni                                                             | 77        | Ni (кулоновское возбуждение)                   | 77        | —               | —                | —               | —               | 9,0           | —     | —     |
| ZnO                                                            | 4,2       | MgO(Ga)                                        | 4,2       | 0,006           | —                | -0,021          | —               | —             | —     | —     |
| ZnO                                                            | 4,2       | ZnO                                            | 4,2       | —               | 0,2              | 0               | —               | —             | —     | —     |
| Ge                                                             | 77        | Ge (кулоновское возбуждение)                   | 77        | 4,4             | 0,64             | +0,11           | —               | —             | —     | —     |
| Ru                                                             | 88        | Ru (Rh)                                        | 85        | 0,37            | 4 <sub>0</sub>   | —               | —               | —             | 0,01  | —     |
| Sn                                                             | 77        | Sn                                             | 77        | 0,6             | —                | —               | —               | —             | 0,14  | —     |
| Sn                                                             | 77        | SnO <sub>2</sub>                               | 77        | 1,4             | —                | +2,55           | —               | —             | 0,29  | —     |
| Mg <sub>2</sub> Sn                                             | 300       | Mg <sub>2</sub> Sn                             | 300       | 1,0             | 5                | —               | —               | —             | —     | —     |
| SnO <sub>2</sub>                                               | 300       | SnO <sub>2</sub>                               | 300       | 1,4             | 31               | —               | —               | —             | 0,70  | —     |
| Te                                                             | 4,2       | Te                                             | 4,2       | 5,2             | 25               | —               | 7,8             | —             | —     | —     |
| TeO <sub>2</sub>                                               | 300       | TeO <sub>2</sub>                               | 77        | 5,2             | —                | —               | —               | —             | —     | —     |
| Na <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>127</sup> I O <sub>6</sub> | 20        | ZnTe                                           | 20        | 4,1             | —                | +1,6            | —               | —             | 0,12  | 0,07  |
| <sup>129</sup> I <sub>2</sub>                                  | 100       | ZnTe                                           | 120       | 0,87            | —                | +0,82           | —               | —             | —     | —     |
| Na <sup>129</sup> I                                            | 77        | ZnTe                                           | 77        | —               | —                | -0,46           | —               | —             | 0,15  | 0,29  |
| <sup>129</sup> XeF <sub>2</sub>                                | 77        | NaI                                            | 4,2       | 21              | 2                | 0               | 42              | —             | —     | —     |
| <sup>129</sup> XeF <sub>2</sub>                                | 77        | NaI                                            | 4,2       | 9               | 2                | 0               | 42              | —             | —     | —     |
| Na <sub>4</sub> <sup>129</sup> XeO <sub>6</sub>                | 4,2       | NaI                                            | 4,2       | 13              | 5,4              | -0,3            | —               | —             | —     | —     |
| <sup>131</sup> XeF <sub>4</sub>                                | 4,2       | Na <sub>2</sub> H <sub>3</sub> IO <sub>6</sub> | —         | 6,8             | —                | —               | 6,0             | —             | —     | —     |
| CsCl                                                           | 4,2       | BaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O          | 4,2       | 1,1             | 0,3 <sub>0</sub> | -0,01           | —               | —             | —     | —     |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | —         | Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | —         | 4               | —                | —               | —               | —             | —     | —     |
| <sup>151</sup> Eu                                              | 4,2       | Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Gd)            | 4,2       | —               | —                | -8,1            | —               | —             | —     | —     |
| <sup>151</sup> Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 77        | Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Gd)            | 77        | —               | 25               | —               | —               | —             | —     | —     |
| EuPd <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>                              | 292       | <sup>161</sup> Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 292       | 2,41            | —                | -8,06           | 1,23            | —             | 0,54  | 0,54  |
| <sup>155</sup> Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (60 кэВ)         | 80        | Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Eu)            | 80        | 4,3             | —                | —               | —               | —             | —     | —     |
| <sup>155</sup> Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (86 кэВ)         | 80        | Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Eu)            | 80        | 1,1             | 0,56             | —               | —               | —             | 0,012 | 0,012 |
| Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>                                 | 80        | Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | 80        | 2               | —                | —               | —               | —             | —     | —     |
| <sup>161</sup> Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | 300       | Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | 300       | 12              | —                | —               | —               | —             | 0,10  | —     |

| Поглотитель                             |           | Источник                                         |           | $\Gamma$ , мм/с | $\epsilon$ , %  | $\delta$ , мм/с | $\Delta$ , мм/с | $B_n$ , Тл | $f_S$ | $f_A$ |
|-----------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|-------|-------|
| Формула                                 | $T_A$ , К | Формула                                          | $T_S$ , К |                 |                 |                 |                 |            |       |       |
| $^{161}\text{Dy}_2\text{O}_3$           | —         | $\text{Gd}_2\text{O}_3$ (Tb)                     | 300       | 13              | 6               | —               | —               | —          | 0,23  | —     |
| $^{160}\text{Er}_2\text{O}_3$           | 20        | $\text{Ho}_2\text{O}_3$                          | 20        | 2               | 21 <sub>0</sub> | 0               | —               | —          | —     | —     |
| Tm                                      | —         | $\text{Er}_2\text{O}_3$                          | 800       | 30              | —               | +5              | 144             | 700,0      | —     | —     |
| $\text{Tm}_2\text{O}_3$                 | —         | $\text{Er}_2\text{O}_3$                          | 300       | 14              | 4               | —               | —               | —          | —     | —     |
| $^{170}\text{Yb}_2\text{O}_3$           | 20        | Tm                                               | 20        | —               | 3,5             | +5,7            | —               | —          | —     | —     |
| $^{171}\text{Yb}_2\text{O}_3$           | 4,2       | $\text{Er}_2\text{O}_3$ (Tm)                     | 4,2       | 11              | 10              | —               | 11              | —          | —     | —     |
| $\text{Hf}_2\text{O}_3$                 | —         | $\text{Lu}_2\text{O}_3$                          | —         | 11              | —               | —               | —               | —          | 0,11  | 0,04  |
| Ta                                      | —         | W                                                | 300       | 0,26            | 4,5             | +0,9            | —               | —          | —     | —     |
| $\text{TaC}$                            | 300       | W                                                | 300       | 0,06            | 0,6             | —               | —               | —          | —     | —     |
| $^{182}\text{W}$                        | 22        | Ta                                               | 22        | 2,0             | 44 <sub>0</sub> | +1,3            | —               | —          | —     | —     |
| $^{182}\text{W}_2\text{O}_3$            | 77        | Ta                                               | 77        | —               | —               | —               | —               | —          | —     | —     |
| $^{183}\text{W}$                        | 300       | Ta                                               | 300       | 40              | 4,4             | +0,17           | —               | —          | —     | —     |
| $^{184}\text{WCl}_6$                    | 4,2       | W(Re)                                            | 4,2       | —               | —               | -0,10           | —               | —          | —     | —     |
| $^{186}\text{W}$                        | 4,2       | Re                                               | 4,2       | 4,26            | —               | —               | —               | —          | —     | —     |
| $^{186}\text{Os}$                       | 10        | Re                                               | 10        | 3,3             | 74              | —               | —               | —          | —     | —     |
| $^{186}\text{Os}$                       | 15        | Re                                               | 15        | 7,5             | 23 <sub>0</sub> | —               | —               | —          | 0,02  | 0,11  |
| $\text{Ir}(\text{CO})_3\text{Cl}_{1,1}$ | 4,2       | $^{193}\text{Ir}$                                | 4,2       | —               | —               | -0,04           | 2,06            | —          | —     | —     |
| $^{191}\text{Ir}$                       | 91        | Os                                               | 91        | 29              | 1,1             | —               | —               | —          | 0,07  | —     |
| $^{193}\text{Ir}$                       | 4,2       | Os                                               | 4,2       | —               | —               | +0,6            | —               | —          | —     | —     |
| Pt                                      | 20        | Pt(Au)                                           | 20        | —               | 4               | —               | —               | —          | —     | 0,13  |
| Pt                                      | —         | Cu(Au)                                           | 4,2       | 20              | 4               | —               | —               | —          | —     | —     |
| Au                                      | 4,2       | Pt                                               | 4,2       | 6               | 8 <sub>0</sub>  | -1,2            | —               | —          | 0,34  | 0,14  |
| $^{199}\text{Hg}_2\text{Pt}$            | 4,2       | $^{199}\text{Au}(\text{Pt})$                     | 4,2       | 0,37            | 0,004           | +0,1            | 1,83            | —          | 0,004 | 0,004 |
| $^{231}\text{Pa}$                       | 4,2       | $^{231}\text{ThO}_2$                             | 4,2       | 4,1             | 0,73            | +0,1            | 7,8             | —          | —     | —     |
| $^{232}\text{ThO}_2$                    | 25        | $^{232}\text{Th}$ (кулоновское воз-<br>буждение) | 30        | 9,6             | —               | +0,08           | —               | —          | 0,31  | 0,35  |
| $^{238}\text{UO}_2$                     | 4,2       | $^{242}\text{PuO}_2$                             | 4,2       | 45              | 4               | +2              | —               | 270,0      | —     | —     |
| $^{239}\text{PuO}_2$                    | 4,2       | $^{239}\text{NpO}_2(\text{ThO}_2)$               | 4,2       | 5,1             | 2               | 0               | —               | —          | —     | —     |
| $^{240}\text{PuO}_2$                    | 4,2       | $^{244}\text{CmO}_2$                             | 4,2       | 58              | 1,2             | 0,5             | —               | —          | —     | —     |
| $^{243}\text{AmO}_2$                    | 4,2       | $^{243}\text{PuO}_2$                             | 4,2       | 22              | 0,66            | 0               | 0               | 0          | —     | —     |
| $^{237}\text{NpAl}_2$                   | 4,2       | $^{241}\text{Am}$ (Th)                           | 78        | 1,1             | 0,04            | 10              | —               | —          | —     | —     |

Таблица 38.4. Значения параметров спектров ядер  $^{237}\text{Np}$  в некоторых матрицах

| Поглотитель             | $T$ , К | Источник                          | $T$ , К | $\delta$ , мм/с | $B_n$ , Тл | $\Delta$ , мм/с | $\Gamma$ , мм/с |
|-------------------------|---------|-----------------------------------|---------|-----------------|------------|-----------------|-----------------|
| $\text{NpO}_2$          | 4,2     | $\text{NpO}_2(\text{UO}_2)$       | 4,2     | 0               | —          | —               | 6               |
| $\text{NpO}_2$          | 78      | $\text{NpO}_2(\text{UO}_2)$       | 78      | 0               | —          | —               | 3               |
| $\text{NpAl}_2$         | 78      | $\text{NpO}_2(\text{UO}_2)$       | 78      | +5,6            | 0          | 0               | 2               |
| $\text{NpAl}_2$         | 4,2     | $\text{NpO}_2(\text{UO}_2)$       | 4,2     | +6,7            | 315,0      | 0,55            | —               |
| $\text{NpO}_2$          | 4,2     | Am                                | 4,2     | +7,5            | 4,0        | —               | 4,1             |
| $\text{NpO}_2$          | 78      | Am                                | 4,2     | —               | 0          | —               | 3,2             |
| $\text{NpO}_2$          | 78      | Am                                | 78      | +7,5            | 0          | —               | 2,6             |
| $\text{NpAl}_2$         | 78      | Am                                | 4,2     | —               | 0          | —               | 3,0             |
| $\text{NpO}_2$          | 4,2     | Th(Am)                            | 4,2     | +3,5            | 4,0        | —               | 2,0             |
| $\text{NpO}_2$          | 77      | Th(Am)                            | 77      | +3,5            | 0          | —               | 1,7             |
| $\text{Np}_3\text{O}_8$ | 77      | Th(Am)                            | 77      | -2,1            | 0          | 1,4             | —               |
| $\text{NpAl}_2$         | 78      | Th(Am)                            | 4,2     | —               | 0          | —               | 1,1             |
| $\text{NpO}_2$          | 4,2     | Cu(Am)                            | 4,2     | —               | —          | —               | 10,8            |
| $\text{NpO}_2$          | 77      | $\text{NpO}_2(\text{AmO}_2)$      | 77      | 0               | —          | —               | 2,5             |
| $\text{NpO}_2$          | 77      | $\text{UO}_2$                     | 77      | —               | —          | —               | 1,7             |
| $\text{NpO}_2$          | 77      | $\text{AmO}_2\text{—I}$           | 77      | +1,1            | —          | —               | —               |
| $\text{NpO}_2$          | 77      | $\text{AmO}_2\text{—II}$          | 77      | +25,2           | —          | —               | —               |
| $\text{NpCl}_4$         | 4,2     | $\text{NpO}_2(\text{UO}_2)$       | 4,2     | +2,2            | 260,0      | -4,2            | —               |
| $\text{NpCl}_4$         | 77      | $\text{NpO}_2(\text{UO}_2)$       | 77      | +1,7            | 0          | 8,8             | —               |
| $\text{NpO}_2$          | 77      | $\text{Am}_2\text{O}_3\text{—I}$  | 77      | +1,8            | —          | —               | —               |
| $\text{NpO}_2$          | 77      | $\text{Am}_2\text{O}_3\text{—II}$ | 77      | +28             | —          | —               | —               |
| $\text{NpO}_2$          | 4,2     | $\text{AmF}_3$                    | 4,2     | -44,6           | —          | —               | —               |

| Поглотитель                                                                          | T, К | Источник                                                                          | T, К | $\delta$ , мм/с            | $B_n$ , Тл | $\Delta$ , мм/с | $\Gamma$ , мм/с |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------|------------|-----------------|-----------------|
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 4,2  | Am <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O | 4,2  | —40,5                      | —          | —               | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 77   | AmCl <sub>3</sub>                                                                 | 77   | —38,5                      | —          | —               | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 77   | AmOCl                                                                             | 77   | —35,6                      | —          | —               | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 4,2  | Am(OH) <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O                                            | 4,2  | —40,9                      | —          | —               | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 4,2  | K <sub>5</sub> [AmO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub> ] <sub>3</sub>   | 4,2  | +25,0                      | —          | —               | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 77   | AmSb                                                                              | 4,2  | +21,0                      | —          | —               | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 77   | Am <sub>3</sub> Se <sub>4</sub>                                                   | 4,2  | +27                        | —          | 39              | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 77   | Am <sub>3</sub> Te <sub>4</sub>                                                   | 4,2  | +29                        | —          | 39              | —               |
| NpO <sub>2</sub>                                                                     | 77   | Am <sub>2</sub> C <sub>3</sub>                                                    | 4,2  | —6,5                       | —          | 134             | —               |
| Np <sub>2</sub> C <sub>3</sub>                                                       | 77   | Am                                                                                | 4,2  | —7,4 (NpO <sub>2</sub> )   | 240,0      | —               | —               |
| $\alpha$ -Np-I                                                                       | 4,2  | —                                                                                 | 4,2  | +2,0 (NpO <sub>2</sub> )   | —          | 29,3            | —               |
| $\alpha$ -Np-II                                                                      | 4,2  | —                                                                                 | 4,2  | —0,7 (NpO <sub>2</sub> )   | —          | 92,4            | —               |
| NpO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · xH <sub>2</sub> O                 | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —36 (NpO <sub>2</sub> )    | 270,0      | 1,8             | —               |
| K <sub>3</sub> NpO <sub>2</sub> F <sub>5</sub>                                       | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —46 (NpO <sub>2</sub> )    | 230,0      | 5,0             | —               |
| KNpO <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                                    | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —12 (NpO <sub>2</sub> )    | 640,0      | —3,1            | —               |
| HNpO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O                  | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —17 (NpO <sub>2</sub> )    | 680,0      | 2,8             | —               |
| NpRh <sub>3</sub>                                                                    | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —3,21 (NpAl <sub>2</sub> ) | —          | —               | 1,7             |
| NpPd <sub>3</sub>                                                                    | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —2,19 (NpAl <sub>2</sub> ) | 335,0      | —               | 1,7             |
| NpGe <sub>3</sub>                                                                    | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | +0,76 (NpAl <sub>2</sub> ) | —          | —               | 1,7             |
| NpSn <sub>3</sub>                                                                    | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | +1,82 (NpAl <sub>2</sub> ) | 55,0       | —               | 1,7             |
| NpC                                                                                  | 4,2  | —                                                                                 | 4,2  | —12                        | 479,0      | 1,1             | —               |
| NpAs                                                                                 | 4,2  | —                                                                                 | —    | —                          | 470,0      | —               | —               |
| NpSb                                                                                 | 4,2  | —                                                                                 | —    | —                          | 470,0      | —               | —               |
| NpP-I                                                                                | 4,2  | —                                                                                 | —    | —                          | 330,0      | —               | —               |
| NpP-II                                                                               | 4,2  | —                                                                                 | —    | —                          | 420,0      | —               | —               |
| NpN                                                                                  | 4,2  | —                                                                                 | —    | —                          | 270,0      | —               | —               |
| RbNpO <sub>4</sub>                                                                   | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —52,2                      | —          | 150             | 3,5             |
| CsNpO <sub>4</sub>                                                                   | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —52,7                      | —          | 138             | 3,2             |
| Cs <sub>3</sub> NpO <sub>5</sub>                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —58,0                      | —          | 81,5            | 2,7             |
| Li <sub>5</sub> NpO <sub>6</sub>                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —63,2                      | —          | 35              | 3,0             |
| Rb <sub>3</sub> NpO <sub>5</sub>                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —59,0                      | —          | 90              | 2,6             |
| NpAs <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +3,0 (NpAl <sub>2</sub> )  | 288,0      | 23              | 4,5             |
| NpF <sub>3</sub>                                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +41 (NpAl <sub>2</sub> )   | —          | 0,55            | —               |
| NpMo <sub>6</sub> Se <sub>8</sub>                                                    | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +28 (NpAl <sub>2</sub> )   | —          | —               | —               |
| NpTe <sub>3</sub>                                                                    | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +27,5 (NpAl <sub>2</sub> ) | —          | —               | —               |
| NpS                                                                                  | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +18,5 (NpAl <sub>2</sub> ) | 170,0      | —               | —               |
| NpSb <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +18 (NpAl <sub>2</sub> )   | —          | —               | —               |
| NpSe <sub>3</sub>                                                                    | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +6 (NpAl <sub>2</sub> )    | —          | —               | —               |
| NpS <sub>3</sub>                                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —2 (NpAl <sub>2</sub> )    | —          | —               | —               |
| NpF <sub>4</sub>                                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —8 (NpAl <sub>2</sub> )    | —          | —               | —               |
| NpF <sub>5</sub>                                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —38 (NpAl <sub>2</sub> )   | —          | —               | —               |
| NpF <sub>6</sub>                                                                     | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —64 (NpAl <sub>2</sub> )   | —          | —               | —               |
| K <sub>2</sub> NpO <sub>4</sub>                                                      | 4,2  | —                                                                                 | —    | —57 (NpAl <sub>2</sub> )   | 109,0      | 18              | —               |
| NpCo <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>                                                    | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +12,9                      | 287,0      | —               | —               |
| [(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> N] <sub>2</sub> NpCl <sub>6</sub> -I  | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | +7,1                       | 110,0      | 2,7             | —               |
| [(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> N] <sub>2</sub> NpCl <sub>6</sub> -II | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | +7,5                       | 101,0      | 3,3             | —               |
| [(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> N] <sub>2</sub> NpCl <sub>6</sub>                   | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —6,6                       | 137,0      | 0,9             | —               |
| Cs <sub>2</sub> [Np(NO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ]                                 | 4,2  | Th(Am)                                                                            | 4,2  | —4,0 (NpAl <sub>2</sub> )  | 107,0      | —3,3            | —               |
| NpRu <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | 4,2  | —17 (NpAl <sub>2</sub> )   | —          | —               | —               |
| NpIr <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | —    | —11 (NpAl <sub>2</sub> )   | 108,0      | 0               | —               |
| NpOs <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | —    | —15 (NpAl <sub>2</sub> )   | 76,0       | —               | —               |
| NpCo <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | —    | —22,5                      | 90,0       | —0,4            | —               |
| NpNi <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | —    | —17,9                      | 230,0      | —1              | —               |
| NpFe <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | —    | —24,0                      | 167,0      | —2,8            | —               |
| NpMn <sub>2</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | —    | —20,0                      | 40,0       | —               | —               |
| NpAl <sub>3</sub>                                                                    | 4,2  | —                                                                                 | —    | —                          | 263,0      | —               | —               |
| Np <sub>3</sub> S <sub>5</sub> -I                                                    | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | —5                         | 255,0      | 2               | —               |
| Np <sub>3</sub> S <sub>5</sub> -II                                                   | 4,2  | Am                                                                                | 4,2  | +28                        | 260,0      | —1              | —               |



Таблица 38.5. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{57}\text{Fe}$  ( $\alpha\text{-Fe}$ )

| Источник                       | Поглотитель |        |                   |        |        |                    |        |        |        |        |                                |
|--------------------------------|-------------|--------|-------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------|
|                                | ННП         | Cr     | Нержавеющая сталь | НФЦ    | КФЦ    | $\alpha\text{-Fe}$ | Rh     | Pd     | Cu     | Pt     | $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ |
| ННП                            | 0           | 0,107  | 0,173             | 0,188  | 0,232  | 0,265              | 0,354  | 0,436  | 0,480  | 0,612  | 0,629                          |
| Cr                             | -0,107      | 0      | 0,066             | 0,081  | 0,125  | 0,158              | 0,247  | 0,329  | 0,373  | 0,505  | 0,522                          |
| Нержавеющая сталь              | -0,173      | -0,066 | 0                 | 0,015  | 0,059  | 0,092              | 0,180  | 0,263  | 0,307  | 0,438  | 0,456                          |
| НФЦ                            | -0,188      | -0,081 | -0,015            | 0      | 0,044  | 0,076              | 0,165  | 0,248  | 0,292  | 0,423  | 0,440                          |
| КФЦ                            | -0,232      | -0,125 | -0,059            | -0,044 | 0      | 0,033              | 0,121  | 0,204  | 0,248  | 0,379  | 0,397                          |
| $\alpha\text{-Fe}$             | -0,265      | -0,158 | -0,092            | -0,076 | -0,033 | 0                  | 0,089  | 0,171  | 0,215  | 0,347  | 0,364                          |
| Rh                             | -0,354      | -0,247 | -0,180            | -0,165 | -0,121 | -0,089             | 0      | 0,083  | 0,127  | 0,258  | 0,275                          |
| Pd                             | -0,436      | -0,329 | -0,263            | -0,248 | -0,204 | -0,171             | -0,083 | 0      | 0,044  | 0,175  | 0,193                          |
| Cu                             | -0,480      | -0,373 | -0,307            | -0,292 | -0,248 | -0,215             | -0,127 | -0,044 | 0      | 0,131  | 0,149                          |
| Pt                             | -0,612      | -0,505 | -0,438            | -0,423 | -0,379 | -0,347             | -0,258 | -0,175 | -0,131 | 0      | 0,017                          |
| $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ | -0,629      | -0,522 | -0,456            | -0,440 | -0,397 | -0,364             | -0,275 | -0,193 | -0,149 | -0,017 | 0                              |

Примечание. ННП — натрия нитропруссид, НФЦ — натрия ферроцианид, КФЦ — калия ферроцианид.

## 38.4. ИЗОМЕРНЫЙ СДВИГ

В табл. 38.5—38.21 приведены относительные изомерные сдвиги  $\delta$  для ядер резонансного изотопа в материалах, используемых в качестве стандартных источников и эталонных поглотителей [12—14]. Для каждого изотопа в скобках указан стандартный эталон.

Таблица 38.6. Относительный изомерный сдвиг, мм/с,  $\delta$  для  $^{99}\text{Ru}$  (Ru)

| Источник       | Поглотитель    |        |        |
|----------------|----------------|--------|--------|
|                | $\text{RuO}_2$ | Ru     | Ru(Rh) |
| $\text{RuO}_2$ | 0              | 0,25   | 0,26   |
| Ru             | -0,25          | 0      | 0,006  |
| Ru(Rh)         | -0,26          | -0,006 | 0      |

Таблица 38.7. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{119}\text{Sn}$  ( $\text{SnO}_2$ )

| Источник                  | Поглотитель    |                           |       |        |                        |                        |                    |                   |      |
|---------------------------|----------------|---------------------------|-------|--------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|------|
|                           | $\text{SnO}_2$ | $\text{Me}_2\text{SnF}_2$ | V(Sn) | Pd(Sn) | $\text{Pd}_3\text{Sn}$ | $\text{Mg}_2\text{Sn}$ | $\alpha\text{-Sn}$ | $\beta\text{-Sn}$ | SnTe |
| $\text{SnO}_2$            | 0              | 1,29                      | 1,58  | 1,59   | 1,76                   | 1,86                   | 2,02               | 2,54              | 3,46 |
| $\text{Me}_2\text{SnF}_2$ | -1,29          | 0                         | 0,29  | 0,30   | 0,47                   | 0,57                   | 0,73               | 1,26              | 2,17 |
| V(Sn)                     | -1,58          | -0,29                     | 0     | 0,01   | 0,18                   | 0,28                   | 0,44               | 0,96              | 1,88 |
| Pd(Sn)                    | -1,59          | -0,30                     | -0,01 | 0      | 0,17                   | 0,27                   | 0,43               | 0,95              | 1,87 |
| $\text{Pd}_3\text{Sn}$    | -1,76          | -0,47                     | -0,18 | -0,17  | 0                      | 0,10                   | 0,26               | 0,78              | 1,70 |
| $\text{Mg}_2\text{Sn}$    | -1,86          | -0,57                     | -0,28 | -0,27  | -0,10                  | 0                      | 0,16               | 0,682             | 1,60 |
| $\alpha\text{-Sn}$        | -2,02          | -0,73                     | -0,44 | -0,43  | -0,26                  | -0,16                  | 0                  | 0,52              | 1,44 |
| $\beta\text{-Sn}$         | -2,54          | -1,26                     | -0,96 | -0,95  | -0,78                  | -0,682                 | -0,52              | 0                 | 0,92 |
| SnTe                      | -3,46          | -2,17                     | -1,88 | -1,87  | -1,70                  | -1,60                  | -1,44              | -0,92             | 0    |

Примечание. Изомерные сдвиги для  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{CaSnO}_3$  и  $\text{BaSnO}_3$  экспериментально идентичны.

Таблица 38.8. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$  для  $^{121}\text{Sb}$  (InSb)

| Источник                              | Поглотитель       |       |                                       |                |
|---------------------------------------|-------------------|-------|---------------------------------------|----------------|
|                                       | $\beta\text{-Sn}$ | InSb  | $\text{Ni}_{21}\text{Sn}_2\text{B}_6$ | $\text{SnO}_2$ |
| $\beta\text{-Sn}$                     | 0                 | 2,6   | 4,3                                   | 11,1           |
| InSb                                  | -2,6              | 0     | 1,67                                  | 8,55           |
| $\text{Ni}_{21}\text{Sn}_2\text{B}_6$ | -4,3              | -1,67 | 0                                     | 6,88           |
| $\text{SnO}_2$                        | -11,1             | -8,55 | -6,88                                 | 0              |

Таблица 38.9. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{125}\text{Te}$  (ZnTe)

| Источник             | Поглотитель          |        |       |       |      |      |
|----------------------|----------------------|--------|-------|-------|------|------|
|                      | $\beta\text{-TeO}_3$ | Cu(Sb) | Cu(I) | ZnTe  | SnTe | PbTe |
| $\beta\text{-TeO}_3$ | 0                    | 1,07   | 1,11  | 1,14  | 1,2  | 1,31 |
| Cu(Sb)               | -1,07                | 0      | 0,04  | 0,07  | 0,1  | 0,24 |
| Cu(I)                | -1,11                | -0,04  | 0     | 0,03  | 0,1  | 0,19 |
| ZnTe                 | -1,14                | -0,07  | -0,03 | 0     | 0,1  | 0,17 |
| SnTe                 | -1,2                 | -0,1   | -0,1  | -0,1  | 0    | 0,1  |
| PbTe                 | -1,31                | -0,24  | -0,19 | -0,17 | -0,1 | 0    |

Таблица 38.10. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{127}\text{I}(\text{CuI})$

| Источник | Поглотитель |       |       |       |      |
|----------|-------------|-------|-------|-------|------|
|          | ZnTe        | CsI   | NaI   | KI    | CuI  |
| ZnTg     | 0           | 0,12  | 0,14  | 0,16  | 0,28 |
| CsI      | -0,12       | 0     | 0,02  | 0,04  | 0,16 |
| NaI      | -0,14       | -0,02 | 0     | 0,02  | 0,14 |
| KI       | -0,16       | -0,04 | -0,02 | 0     | 0,13 |
| CuI      | -0,28       | -0,16 | -0,14 | -0,13 | 0    |

Таблица 38.11. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{129}\text{I}(\text{CuI})$

| Источник | Поглотитель |       |       |       |      |
|----------|-------------|-------|-------|-------|------|
|          | NaI         | KI    | CuI   | CsI   | ZnTe |
| NaI      | —           | 0,01  | 0,05  | 0,08  | 0,45 |
| KI       | -0,01       | 0     | 0,04  | 0,07  | 0,44 |
| CuI      | -0,05       | -0,04 | 0     | 0,03  | 0,41 |
| CsI      | -0,08       | -0,07 | -0,03 | 0     | 0,38 |
| ZnTe     | -0,45       | -0,44 | -0,41 | -0,38 | 0    |

Таблица 38.12. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{149}\text{Sm}(\text{SmF}_3)$

| Источник                | Поглотитель    |                         |                |                         |
|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
|                         | $\text{EuF}_3$ | $\text{Eu}_2\text{O}_3$ | $\text{SmF}_3$ | $\text{Fm}_2\text{O}_3$ |
| $\text{EuF}_3$          | 0              | 0,01                    | 0,01           | 0,04                    |
| $\text{Eu}_2\text{O}_3$ | -0,01          | 0                       | 0,00           | 0,03                    |
| $\text{SmF}_3$          | -0,01          | 0,00                    | 0              | 0,03                    |
| $\text{Sm}_2\text{O}_3$ | -0,04          | -0,03                   | -0,03          | 0                       |

Таблица 38.13. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{151}\text{Eu}(\text{EuF}_3)$

| Источник                                 | Поглотитель  |                |                |                                          |                         |                         |
|------------------------------------------|--------------|----------------|----------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                          | $\text{EuS}$ | $\text{SmF}_3$ | $\text{EuF}_3$ | $\text{EuF}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | $\text{Eu}_2\text{O}_3$ | $\text{Sm}_2\text{O}_3$ |
| $\text{EuS}$                             | 0            | 11,45          | 11,50          | 11,53                                    | 12,52                   | 12,56                   |
| $\text{SmF}_3$                           | -11,45       | 0              | 0,05           | 0,09                                     | 1,07                    | 1,11                    |
| $\text{EuF}_3$                           | -11,50       | -0,05          | 0              | 0,038                                    | 1,024                   | 1,06                    |
| $\text{EuF}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | -11,53       | -0,09          | -0,038         | 0                                        | 0,98                    | 1,02                    |
| $\text{Eu}_2\text{O}_3$                  | -12,52       | -1,07          | -1,024         | -0,98                                    | 0                       | 0,04                    |
| $\text{Sm}_2\text{O}_3$                  | -12,56       | -1,11          | -1,06          | -1,02                                    | -0,04                   | 0                       |

Таблица 38.14. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{163}\text{Eu}(\text{EuF}_3)$

| Источник                | Поглотитель             |                         |                |              |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|--------------|
|                         | $\text{Eu}_2\text{O}_3$ | $\text{Sm}_2\text{O}_3$ | $\text{EuF}_3$ | $\text{EuS}$ |
| $\text{Eu}_2\text{O}_3$ | 0                       | 0,25                    | 1,2            | 15,2         |
| $\text{Sm}_2\text{O}_3$ | -0,25                   | 0                       | 0,9            | 15,0         |
| $\text{EuF}_3$          | -1,2                    | -0,9                    | 0              | 14,0         |
| $\text{EuS}$            | -15,2                   | -15,0                   | -14,0          | 0            |

Таблица 38.15. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{155}\text{Cd}(\text{CdF}_3)$

| Источник                   | Поглотитель            |       |                            |                |
|----------------------------|------------------------|-------|----------------------------|----------------|
|                            | $\text{Pd}(\text{Eu})$ | Gd    | $\text{SmAl}_3(\text{Eu})$ | $\text{GdF}_3$ |
| $\text{Pd}(\text{Eu})$     | 0                      | 0,07  | 0,53                       | 0,66           |
| Gd                         | -0,07                  | 0     | 0,46                       | 0,59           |
| $\text{SmAl}_3(\text{Eu})$ | -0,53                  | -0,46 | 0,0                        | 0,14           |
| $\text{GdF}_3$             | -0,66                  | -0,59 | -0,14                      | 0              |

Таблица 38.16. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{161}\text{Dy}(\text{DyF}_3)$

| Источник                           | Поглотитель    |                           |                                    |                         |         |      |
|------------------------------------|----------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|---------|------|
|                                    | $\text{DyF}_3$ | $\text{GdF}_3(\text{Tb})$ | $\text{Gd}_2\text{O}_3(\text{Tb})$ | $\text{Dy}_2\text{O}_3$ | Gd (Tb) | Dy   |
| $\text{DyF}_3$                     | 0              | 0,2                       | 0,5                                | 0,67                    | 2,26    | 2,9  |
| $\text{GdF}_3(\text{Tb})$          | -0,2           | 0                         | 0,3                                | 0,5                     | 2,1     | 2,7  |
| $\text{Gd}_2\text{O}_3(\text{Tb})$ | -0,5           | -0,3                      | 0                                  | 0,1                     | 1,7     | 2,4  |
| $\text{Dy}_2\text{O}_3$            | -0,67          | -0,5                      | -0,1                               | 0                       | 1,6     | 2,21 |
| Gd (Tb)                            | -2,26          | -2,1                      | -1,7                               | -1,6                    | 0       | 0,62 |
| Dy                                 | -2,9           | -2,7                      | -2,4                               | -2,21                   | -0,62   | 0    |

Таблица 38.17. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{170}\text{Yb}(\text{YbAl}_2)$

| Источник          | Поглотитель    |       |                 |                   |                 |                 |      |
|-------------------|----------------|-------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|------|
|                   | $\text{YbB}_6$ | Yb    | $\text{YbAl}_2$ | $\text{TmB}_{12}$ | $\text{TmAl}_2$ | $\text{YbAl}_3$ | Tm   |
| $\text{YbB}_6$    | 0              | 0,18  | 0,19            | 0,22              | 0,26            | 0,30            | 0,35 |
| Yb                | -0,18          | 0     | 0,02            | 0,04              | 0,09            | 0,12            | 0,17 |
| $\text{YbAl}_2$   | -0,19          | -0,02 | 0               | 0,02              | 0,07            | 0,10            | 0,15 |
| $\text{TmB}_{12}$ | -0,22          | -0,04 | -0,02           | 0                 | 0,05            | 0,08            | 0,13 |
| $\text{TmAl}_2$   | -0,26          | -0,09 | -0,07           | -0,05             | 0               | 0,03            | 0,08 |
| $\text{YbAl}_3$   | -0,30          | -0,12 | -0,10           | -0,08             | -0,03           | 0               | 0,05 |
| Tm                | -0,35          | -0,17 | -0,15           | -0,13             | -0,08           | -0,05           | 0    |

Таблица 38.18. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{181}\text{Ta}(\text{Ta})$

| Источник              | Поглотитель           |        |       |
|-----------------------|-----------------------|--------|-------|
|                       | $\text{Mo}(\text{W})$ | W      | Ta    |
| $\text{Mo}(\text{W})$ | 0                     | 21,8   | 22,6  |
| W                     | -21,8                 | 0      | 0,835 |
| Ta                    | -22,6                 | -0,835 | 0     |

Таблица 38.19. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{193}\text{Ir}(\text{Ir})$

| Источник | Поглотитель |        |       |       |
|----------|-------------|--------|-------|-------|
|          | Pt          | Ir     | Os    | V(Os) |
| Pt       | 0           | 0,645  | 1,183 | 2,34  |
| Ir       | -0,645      | 0      | 0,539 | 1,70  |
| Os       | -1,183      | -0,539 | 0     | 1,16  |
| V(Os)    | -2,34       | -1,70  | -1,16 | 0     |

Таблица 38.20. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{197}\text{Au}(\text{Au})$

| Источник | Поглотитель |      |
|----------|-------------|------|
|          | Au          | Pt   |
| Au       | 0           | 1,23 |
| Pt       | -1,23       | 0    |

Таблица 38.21. Относительный изомерный сдвиг  $\delta$ , мм/с, для  $^{237}\text{Np}(\text{NpAl}_2)$

| Источник          | Поглотитель |        |                  |                   |
|-------------------|-------------|--------|------------------|-------------------|
|                   | Am          | Th(Am) | NpO <sub>2</sub> | NpAl <sub>2</sub> |
| Am                | 0           | 4,0    | 7,5              | 13,8              |
| Th(Am)            | -4,0        | 0      | 3,5              | 9,8               |
| NpO <sub>2</sub>  | -7,5        | -3,5   | 0                | 6,3               |
| NpAl <sub>2</sub> | -13,8       | -9,8   | -6,3             | 0                 |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химические применения мессбауэровской спектроскопии: Сб. статей: Пер. с англ./Под ред. В. И. Голь-

данского, Л. И. Крижанского. В. В. Храпова. М.: Мир, 1970.

2. Быков Г. М., Фам Зуй Хиен//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1962. Т. 43, № 3. С. 909—918.

3. Вертгейм Г. Эффект Мессбауэра: Пер. с англ./Под ред. В. В. Скляревского. М.: Мир, 1966

4. Шпинель В. С. Резонанс гамма-излучений в кристаллах. М.: Мир, 1969.

5. Иркаев В. С., Кузьмин Р. Н., Опапенко А. А. Ядерный гамма-резонанс. М.: Изд-во МГУ. 1970.

6. Суздалев И. П. Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии. М. Атомиздат, 1979.

7. Shirley D. A.//Rev. Mod. Phys. 1964. Vol. 36. P. 339—352.

8. Muir A. H., Ando K. J., Coogan H. M. Mössbauer Effect Data Index 1958—1965. N. Y. — London—Sydney: Interscience Publ., 1966.

9. Stevens J. G., Stevens V. E. Mössbauer Effect Data Index, covering the 1976 literature. N. Y.: Plenum Press, 1978.

10. Violet C. E., Pipkorn D. N.//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42, N 11. P. 4339—4342.

11. Бескровный А. И., Лебедь Н. А., Останевич Ю. М.: Proc. of the Conf. on Mössbauer Spectrometry. Dresden, 1971. Vol. 2. P. 583—586.

12. Ruby S. L. e. a.//Phys. Rev. 1969. Vol. 184. P. 374—382.

13. Stevens J. G., Gettis W. L. Isomer Shift Reference Scales: Intern. Conf. Mössbauer Effect. Jaipur, India, 1981.

14. Kalvius G. M., Wagner F. E., Potzel W.//J. de Phys. Colloq. C-6. 1976. Vol. 97. P. 657—671.

## Глава 39

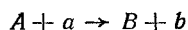
## ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

В. П. Рудаков

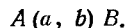
### 39.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В ядерной физике в настоящее время принято различать два класса микрообъектов: атомные ядра и элементарные частицы. Атомными ядрами называют объекты, состоящие из протонов и нейтронов и имеющие массовое число два и более. Все остальные микрообъекты относят к элементарным частицам. Если не требуется специальных уточнений, то и атомные ядра, и элементарные частицы называют микрочастицами или просто частицами.

Ядерной реакцией называют процесс взаимодействия элементарной частицы с ядром или ядер друг с другом. Обычно ядерную реакцию записывают в виде



или сокращенно



Такая запись означает, что в начальной стадии реакции (во входном канале) взаимодействуют две частицы  $A$  и  $a$ , в результате чего в конечной стадии (выходном ка-

нале) появляются частицы  $B$  и  $b$ . Эти частицы могут быть теми же, что и во входном канале (упругое рассеяние); они могут быть теми же частицами, что и во входном канале, но в других внутренних состояниях (неупругое рассеяние); наконец, это могут быть другие частицы и в общем случае их может быть не две, а несколько.

Каждая ядерная реакция описывается двумя основными характеристиками: вероятностью ее протекания и энергетикой, т. е. количеством поглощаемой или выделяемой энергии.

Вероятность ядерной реакции описывается сечением. Единичка сечения — квадратный метр или любая его доля единица, например  $10^{-30} \text{ м}^2 = 1 \text{ фм}^2$ . Раньше для сечения использовалась внесистемная единица барн;  $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$ .

Дифференциальное сечение реакции — это величина, пропорциональная вероятности вылета данной частицы — продукта реакции под определенным углом (относительно направления движения частицы, вызвавшей реакцию) и с данной энергией. Эта величина обозначается  $d\sigma/d\Omega$  и выражается в единицах  $\text{м}^2/\text{ср}$ . Интеграл от дифференциального сечения по полному телесному углу дает полное сечение.

Сечение реакции определяется в конечном счете свойствами сил взаимодействия между частицами и в настоящее время может быть точно рассчитано только для упругого рассеяния в кулоновском поле (резерфордовское рассеяние). Расчет сечений всех остальных разнообразнейших реакций ведется в рамках различных моделей и дает лишь оценочные данные.

Библиография по исследованиям конкретных ядерных реакций и схемы уровней ядер периодически публикуются в журналах Nuclear Data Sheets и Nuclear Physics.

### 39.2. СЕЧЕНИЕ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Дифференциальное сечение резерфордовского рассеяния  $d\sigma/d\Omega$ ,  $\text{фм}^2/\text{ср}$ , нерелятивистской частицы с массой  $m$ , зарядом  $ze$  и энергией  $E$  на ядре с массой  $M$  и зарядом  $Ze$  вычисляется по формуле

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{СЦМ}} = 0,1296 \left(\frac{zZ}{4E}\right)^2 \left(\frac{m+M}{M}\right)^2 \csc^4\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где  $E$  — энергия падающей частицы в лабораторной системе координат (ЛСК), МэВ;  $\theta$  — угол рассеяния в системе центра масс (СЦМ).

Это же сечение в ЛСК получается, если вместо  $\csc^4(\theta/2)$  подставить  $\csc^4(\psi/2) - 2(m/M)^2 + \dots$ , где угол  $\psi$  отсчитывается в ЛСК. Следующий член разложения в скобках имеет порядок  $(m/M)^4$ .

### 39.3. ЭНЕРГИЯ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Энергетические соотношения в ядерной реакции определяются законами сохранения энергии и импульса.

Энергией реакции  $A(a, b)B$  называется величина

$$Q = [(M_A + M_a) - (M_B + M_b)] c^2,$$

где  $M_i$  — массы участвующих в реакции частиц;  $c$  — скорость света.

Для вычисления  $Q$  обычно пользуются не массами ядер, а дефектами масс. Дефектом массы называют величину  $\Delta M = M - A$ , где  $M$  — реальная масса частицы (атома);  $A$  — так называемое массовое число, суммарное число нуклонов (протонов и нейтронов) в атомном ядре. Если  $M$  выражать в атомных единицах массы (а.е.м.) и числу  $A$  приписать ту же единицу, то и  $\Delta M$  получится в а.е.м. Одна а.е.м. равна  $1/12$  массы нуклида  $^{12}\text{C}$  и составляет  $1,6605655 \cdot 10^{-27}$  кг. Для вычисления энергии реакции  $\Delta M$  удобнее выражать в килоэлектрон-вольтах: а.е.м. =  $931501,59$  кэВ.

Смысл использования дефекта масс заключается в том, что при расчетах можно оперировать числами во много раз меньшими, чем массы ядер или энергии связи:

$$Q = (\Delta M_A + \Delta M_a) - (\Delta M_B + \Delta M_b).$$

Значения дефектов масс приведены в табл. 39.1.

Таблица 39.1. Дефекты масс  $\Delta M = M - A$ , кэВ [1] ( $N$  — число нейтронов;  $Z$  — число протонов;  $A = N + Z$  — массовое число;  $s$  — масса получена в результате интерполяции или экстраполяции на основе имеющейся систематики)

| $N$ | $Z$ | $A$ | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|-----|-----|---------|-------------------|
| 1   | 0   | 1   | $n$     | 8071,431 (39)     |
| 0   | 1   | 1   | H       | 7289,034 (23)     |
| 1   | 1   | 2   | H       | 13 135,84 (4)     |
| 2   | 1   | 3   | H       | 14 949,94 (5)     |
| 1   | 2   |     | He      | 14 931,32 (5)     |
| 3   | 1   | 4   | H       | 25 920 (500)      |
| 2   | 2   |     | H       | 2424,94 (4)       |
| 1   | 3   |     | Li      | 25 130 (300)      |
| 4   | 1   | 5   | H       | 33 790 (800)      |
| 3   | 2   |     | He      | 11 390 (50)       |
| 2   | 3   |     | Li      | 11 680 (50)       |
| 4   | 2   | 6   | He      | 17 597,0 (35)     |
| 3   | 3   |     | Li      | 14 087,3 (8)      |
| 2   | 4   |     | Be      | 18 375 (6)        |
| 5   | 2   | 7   | He      | 26 111 (30)       |
| 4   | 3   |     | Li      | 14 908,2 (9)      |
| 3   | 4   |     | Be      | 15 770,1 (9)      |
| 2   | 5   |     | B       | 29 940 (100)      |
| 6   | 2   | 8   | He      | 31 609 (12)       |
| 5   | 3   |     | Li      | 20 946,9 (9)      |
| 4   | 4   |     | Be      | 4941,76 (10)      |
| 3   | 5   |     | B       | 22 921,9 (13)     |
| 2   | 6   |     | C       | 35 085 (25)       |
| 6   | 3   | 9   | Li      | 24 954,8 (20)     |
| 5   | 4   |     | Be      | 11 348,0 (4)      |
| 4   | 5   |     | B       | 12 416,1 (10)     |
| 3   | 6   |     | C       | 28 912,1 (39)     |
| 7   | 3   | 10  | Li      | 33 830 (250)      |
| 6   | 4   |     | Be      | 12 607,6 (6)      |
| 5   | 5   |     | B       | 12 051,7 (5)      |
| 4   | 6   |     | C       | 15 702,9 (7)      |
| 3   | 7   |     | N       | 39 500 (с)        |
| 8   | 3   | 11  | Li      | 40 940 (120)      |
| 7   | 4   |     | Be      | 20 176 (6)        |
| 6   | 5   |     | B       | 8667,9 (4)        |
| 5   | 6   |     | C       | 10 650,0 (11)     |
| 4   | 7   |     | N       | 25 230 (100)      |
| 8   | 4   | 12  | Be      | 25 030 (40)       |
| 7   | 5   |     | B       | 13 369,5 (13)     |
| 6   | 6   |     | C       | 0,0 (0,0)         |
| 5   | 7   |     | N       | 17 338 (1)        |
| 4   | 8   |     | O       | 32 070 (260)      |
| 9   | 4   | 13  | Be      | 34 900 (с)        |
| 8   | 5   |     | B       | 16 562 (4)        |
| 7   | 6   |     | C       | 3125,038 (18)     |
| 6   | 7   |     | N       | 5345,6 (9)        |
| 5   | 8   |     | O       | 23 105 (10)       |
| 10  | 4   | 14  | Be      | 40 970 (с)        |
| 9   | 5   |     | B       | 23 657 (30)       |
| 8   | 6   |     | C       | 3019,922 (24)     |
| 7   | 7   |     | N       | 9863,444 (23)     |
| 6   | 8   |     | O       | 8008,3 (5)        |
| 5   | 9   |     | F       | 33 610 (с)        |
| 10  | 5   | 15  | B       | 29 530 (с)        |
| 9   | 6   |     | C       | 9873,2 (8)        |
| 8   | 7   |     | N       | 101,514 (36)      |
| 7   | 8   |     | O       | 2855,4 (7)        |
| 6   | 9   |     | F       | 17 660 (с)        |
| 11  | 5   | 16  | B       | 38 000 (с)        |
| 10  | 6   |     | C       | 13 693 (16)       |

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 9  | 7  | 17 | N       | 5681,6 (23)       |
| 8  | 8  |    | O       | —4737,02 (4)      |
| 7  | 9  |    | F       | 10 692 (14)       |
| 6  | 10 |    | Ne      | 24 110 (140)      |
| 12 | 5  |    | B       | 45 270 (c)        |
| 11 | 6  | 18 | C       | 21 060 (c)        |
| 10 | 7  |    | N       | 7870 (15)         |
| 9  | 8  |    | O       | —809,9 (8)        |
| 8  | 9  |    | F       | 1951,66 (18)      |
| 7  | 10 |    | Ne      | 16 478 (26)       |
| 12 | 6  | 19 | C       | 25 370 (c)        |
| 11 | 7  |    | N       | 13 274 (30)       |
| 10 | 8  |    | O       | —783,03 (30)      |
| 9  | 9  |    | F       | 872,5 (7)         |
| 8  | 10 |    | Ne      | 5319 (5)          |
| 7  | 11 | 20 | Na      | 25 320 (c)        |
| 13 | 6  |    | C       | 34 430 (c)        |
| 12 | 7  |    | N       | 15 600 (300)      |
| 11 | 8  |    | O       | 3331,4 (27)       |
| 10 | 9  |    | F       | —1487,33 (13)     |
| 9  | 10 | 21 | Ne      | 1750,9 (6)        |
| 8  | 11 |    | Na      | 12 930 (12)       |
| 13 | 7  |    | N       | 22 200 (c)        |
| 12 | 8  |    | O       | 3799 (8)          |
| 11 | 9  |    | F       | —17,1 (6)         |
| 10 | 10 | 22 | Ne      | —7043,0 (5)       |
| 9  | 11 |    | Na      | 6844 (7)          |
| 8  | 12 |    | Mg      | 17 568 (27)       |
| 14 | 7  |    | N       | 26 950 (c)        |
| 13 | 8  |    | O       | 8120 (80)         |
| 12 | 9  | 23 | F       | —47 (7)           |
| 11 | 10 |    | Ne      | —5733,1 (11)      |
| 10 | 11 |    | Na      | —2185,8 (7)       |
| 9  | 12 |    | Mg      | 10 912 (16)       |
| 14 | 8  |    | O       | 9490 (220)        |
| 13 | 9  | 24 | F       | 2826 (30)         |
| 12 | 10 |    | Ne      | —8026,1 (5)       |
| 11 | 11 |    | Na      | —5184,0 (7)       |
| 10 | 12 |    | Mg      | —394,1 (19)       |
| 9  | 13 |    | Al      | 18 210 (c)        |
| 15 | 8  | 25 | O       | 17 950 (c)        |
| 14 | 9  |    | F       | 3350 (170)        |
| 13 | 10 |    | Ne      | —5155,1 (21)      |
| 12 | 11 |    | Na      | —9529,6 (8)       |
| 11 | 12 |    | Mg      | —5470,6 (15)      |
| 10 | 13 | 26 | Al      | 6768 (25)         |
| 15 | 9  |    | F       | 8650 (c)          |
| 14 | 10 |    | Ne      | —5949 (10)        |
| 13 | 11 |    | Na      | —8417,5 (8)       |
| 12 | 12 |    | Mg      | —13 930,6 (7)     |
| 11 | 13 | 27 | Al      | —52 (4)           |
| 10 | 14 |    | Si      | 10 740 (120)      |
| 16 | 9  |    | F       | 12 840 (c)        |
| 15 | 10 |    | Ne      | —2150 (90)        |
| 14 | 11 |    | Na      | —9357 (7)         |
| 13 | 12 | 28 | Mg      | —13 190,8 (11)    |
| 12 | 13 |    | Al      | —8912,9 (11)      |
| 11 | 14 |    | Si      | 3824 (10)         |
| 16 | 10 |    | Ne      | —190 (c)          |
| 15 | 11 |    | Na      | —6888 (23)        |
| 14 | 12 | 29 | Mg      | —16 212,4 (9)     |
| 13 | 13 |    | Al      | —12 207,6 (10)    |
| 12 | 14 |    | Si      | —7143,1 (31)      |
| 11 | 15 |    | P       | 11 260 (c)        |

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 17 | 10 | 27 | Ne      | 6670 (c)          |
| 16 | 11 |    | Na      | —5630 (80)        |
| 15 | 12 |    | Mg      | —14 585,0 (14)    |
| 14 | 13 |    | Al      | —17 194,3 (7)     |
| 13 | 14 |    | Si      | —12 385,3 (15)    |
| 12 | 15 | 28 | P       | —590 (c)          |
| 17 | 11 |    | Na      | —1130 (120)       |
| 16 | 12 |    | Mg      | —15 016,4 (22)    |
| 15 | 13 |    | Al      | —16 848,2 (8)     |
| 14 | 14 |    | Si      | —21 491,2 (6)     |
| 13 | 15 | 29 | P       | —7159,5 (38)      |
| 12 | 16 |    | S       | 4190 (120)        |
| 18 | 11 |    | Na      | 2660 (150)        |
| 17 | 12 |    | Mg      | —10 750 (50)      |
| 16 | 13 |    | Al      | —18 212 (5)       |
| 15 | 14 | 30 | Si      | —21 893,7 (8)     |
| 14 | 15 |    | P       | —16 949,3 (18)    |
| 13 | 16 |    | S       | —3160 (50)        |
| 19 | 11 |    | Na      | 8380 (300)        |
| 18 | 12 |    | Mg      | —9790 (c)         |
| 17 | 13 | 31 | Al      | —15 890 (40)      |
| 16 | 14 |    | Si      | —24 431,7 (9)     |
| 15 | 15 |    | P       | —20 204,5 (27)    |
| 14 | 16 |    | S       | —14 062,0 (31)    |
| 13 | 17 |    | Cl      | 4840 (c)          |
| 20 | 11 | 32 | Na      | 10 610 (c)        |
| 19 | 12 |    | Mg      | —3900 (c)         |
| 18 | 13 |    | Al      | —15 100 (100)     |
| 17 | 14 |    | Si      | —22 948,7 (10)    |
| 16 | 15 |    | P       | —24 439,5 (6)     |
| 15 | 16 | 33 | S       | —19 044,1 (16)    |
| 14 | 17 |    | Cl      | —7070 (50)        |
| 21 | 11 |    | Na      | 16 410 (c)        |
| 20 | 12 |    | Mg      | —2890 (c)         |
| 19 | 13 |    | Al      | —11 290 (c)       |
| 18 | 14 | 34 | Si      | —24 092 (7)       |
| 17 | 15 |    | P       | —24 304,7 (8)     |
| 16 | 16 |    | S       | —26 015,1 (6)     |
| 15 | 17 |    | Cl      | —13 329 (8)       |
| 14 | 18 |    | Ar      | —2210 (130)       |
| 21 | 12 | 35 | Mg      | 4130 (c)          |
| 20 | 13 |    | Al      | —9370 (c)         |
| 19 | 14 |    | Si      | —20 570 (50)      |
| 18 | 15 |    | P       | —26 336,9 (21)    |
| 17 | 16 |    | S       | —26 585,9 (8)     |
| 16 | 17 | 36 | Cl      | —21 003,0 (9)     |
| 15 | 18 |    | Ar      | —9385 (30)        |
| 21 | 13 |    | Al      | —4150 (c)         |
| 20 | 14 |    | Si      | —20 250 (c)       |
| 19 | 15 |    | P       | —24 550 (50)      |
| 18 | 16 | 37 | S       | —29 931,25 (28)   |
| 17 | 17 |    | Cl      | —24 438,3 (8)     |
| 16 | 18 |    | Ar      | —18 379,2 (30)    |
| 15 | 19 |    | K       | —1480 (c)         |
| 22 | 13 |    | Al      | —840 (c)          |
| 21 | 14 | 38 | Si      | —15 040 (c)       |
| 20 | 15 |    | P       | —24 940 (80)      |
| 19 | 16 |    | S       | —28 846,27 (21)   |
| 18 | 17 |    | Cl      | —29 013,73 (10)   |
| 17 | 18 |    | Ac      | —23 048,9 (16)    |
| 16 | 19 | 39 | K       | —11 169 (20)      |
| 22 | 14 |    | Si      | —12 670 (c)       |
| 21 | 15 |    | P       | —20 770 (c)       |

Продолжение табл. 39.1

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 20 | 16 | 37 | S       | —30 665,9 (15)    |
| 19 | 17 |    | Cl      | —29 521,77 (21)   |
| 18 | 18 |    | Ar      | —30 231,32 (28)   |
| 17 | 19 |    | K       | —17 426 (8)       |
| 16 | 20 |    | Ca      | —6650 (270)       |
| 23 | 14 |    | Si      | —7010 (c)         |
| 22 | 15 |    | P       | —19 010 (c)       |
| 21 | 16 |    | S       | —26 908 (30)      |
| 20 | 17 |    | Cl      | —31 761,76 (13)   |
| 19 | 18 |    | Ar      | —30 947,9 (6)     |
| 18 | 19 | 38 | K       | —24 799,4 (14)    |
| 17 | 20 |    | Ca      | —13 164 (39)      |
| 23 | 15 |    | P       | —14 560 (c)       |
| 22 | 16 |    | S       | —26 862 (12)      |
| 21 | 17 |    | Cl      | —29 798,0 (4)     |
| 20 | 18 |    | Ar      | —34 715,0 (8)     |
| 19 | 19 |    | K       | —28 802,0 (16)    |
| 18 | 20 |    | Ca      | —22 060 (9)       |
| 17 | 21 |    | Sc      | —4460 (c)         |
| 24 | 15 | 39 | P       | —12 300 (c)       |
| 23 | 16 |    | S       | —23 000 (c)       |
| 22 | 17 |    | Cl      | —29 803 (18)      |
| 21 | 18 |    | Ar      | —33 241 (5)       |
| 20 | 19 |    | K       | —33 806,2 (8)     |
| 19 | 20 |    | Ca      | —27 282 (5)       |
| 18 | 21 |    | Sc      | —14 080 (c)       |
| 24 | 16 | 40 | S       | —22 240 (c)       |
| 23 | 17 |    | Cl      | —27 540 (500)     |
| 22 | 18 |    | Ar      | —35 040,2 (7)     |
| 21 | 19 |    | K       | —33 535,2 (8)     |
| 20 | 20 |    | Ca      | —34 846,8 (8)     |
| 19 | 21 |    | Sc      | —20 527 (4)       |
| 18 | 22 |    | Ti      | —9040 (230)       |
| 25 | 16 | 41 | S       | —18 100 (c)       |
| 24 | 17 |    | Cl      | —27 400 (160)     |
| 23 | 18 |    | Ar      | —33 067,7 (9)     |
| 22 | 19 |    | K       | —35 559,7 (9)     |
| 21 | 20 |    | Ca      | —35 138,5 (9)     |
| 20 | 21 |    | Sc      | —28 643,5 (16)    |
| 19 | 22 |    | Ti      | —15 780 (40)      |
| 25 | 17 | 42 | Cl      | —24 420 (c)       |
| 24 | 18 |    | Ar      | —34 420 (40)      |
| 23 | 19 |    | K       | —35 022,8 (13)    |
| 22 | 20 |    | Ca      | —35 543,9 (14)    |
| 21 | 21 |    | Sc      | —32 120,7 (16)    |
| 20 | 22 |    | Ti      | —25 122 (6)       |
| 19 | 23 |    | V       | —8020 (c)         |
| 26 | 17 | 43 | Cl      | —23 140 (60)      |
| 25 | 18 |    | Ar      | —31 980 (70)      |
| 24 | 19 |    | K       | —36 588 (10)      |
| 23 | 20 |    | Ca      | —38405,4 (14)     |
| 22 | 21 |    | Sc      | —36 185,0 (24)    |
| 21 | 22 |    | Ti      | —29 324 (7)       |
| 20 | 23 |    | V       | —18 020 (c)       |
| 26 | 18 | 44 | Ar      | —32 271 (20)      |
| 25 | 19 |    | K       | —35 807 (39)      |
| 24 | 20 |    | Ca      | —41 466,0 (14)    |
| 23 | 21 |    | Sc      | 37 810,7 (24)     |
| 22 | 22 |    | Ti      | —37 546,2 (31)    |
| 21 | 23 |    | V       | —23 850 (c)       |
| 20 | 24 |    | Cr      | —13 500 (130)     |
| 27 | 18 | 45 | Ar      | —29 730 (60)      |
| 26 | 19 |    | K       | —36 611 (11)      |

Продолжение табл. 39.1

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 25 | 20 | 46 | Ca      | —40 809,6 (15)    |
| 24 | 21 |    | Sc      | —41 066,5 (14)    |
| 23 | 22 |    | Ti      | —39 004,0 (28)    |
| 22 | 23 |    | V       | —31 879 (27)      |
| 21 | 24 |    | Cr      | —19 460 (150)     |
| 28 | 18 |    | Ar      | —29 730 (70)      |
| 27 | 19 |    | K       | —35 420 (16)      |
| 26 | 20 |    | Ca      | —43 138,2 (37)    |
| 25 | 21 |    | Sc      | —41 755,6 (15)    |
| 24 | 22 |    | Ti      | —44 122,7 (14)    |
| 23 | 23 | 47 | V       | —37 070,8 (18)    |
| 22 | 24 |    | Cr      | —29 461 (30)      |
| 21 | 25 |    | Mn      | —12 470 (c)       |
| 28 | 19 |    | K       | —35 698 (8)       |
| 27 | 20 |    | Ca      | —42 342,9 (37)    |
| 26 | 21 |    | Sc      | —44 330,5 (24)    |
| 25 | 22 |    | Ti      | —44 931,0 (15)    |
| 24 | 23 |    | V       | —42 001,1 (17)    |
| 23 | 24 |    | Cr      | —34 618 (25)      |
| 22 | 25 |    | Mn      | —22 920 (c)       |
| 29 | 29 | 48 | K       | —32 220 (500)     |
| 28 | 20 |    | Ca      | —44 216 (4)       |
| 27 | 21 |    | Sc      | —44 498 (6)       |
| 26 | 22 |    | Ti      | —48 487,7 (14)    |
| 25 | 23 |    | V       | —44 472,8 (31)    |
| 24 | 24 |    | Cr      | —42 818 (7)       |
| 23 | 25 |    | Mn      | —29 170 (c)       |
| 29 | 20 | 49 | Ca      | —41 286 (5)       |
| 28 | 21 |    | Sc      | —46 555 (4)       |
| 27 | 22 |    | Ti      | —48 558,7 (14)    |
| 26 | 23 |    | V       | —47 956,9 (16)    |
| 25 | 24 |    | Cr      | —45 329,0 (26)    |
| 24 | 25 |    | Mn      | —37 613 (24)      |
| 23 | 26 |    | Fe      | —24 470 (160)     |
| 30 | 20 | 50 | Ca      | —39 572 (8)       |
| 29 | 21 |    | Sc      | —44 539 (16)      |
| 28 | 22 |    | Ti      | —51 432,1 (26)    |
| 27 | 23 |    | V       | —49 219,3 (16)    |
| 26 | 24 |    | Cr      | —50 258,0 (14)    |
| 25 | 25 |    | Mn      | —42 625,7 (17)    |
| 24 | 26 |    | Fe      | —34 430 (c)       |
| 30 | 21 | 51 | Sc      | —43 220 (20)      |
| 29 | 22 |    | Ti      | —49 733,0 (28)    |
| 28 | 23 |    | V       | —52 199,1 (14)    |
| 27 | 24 |    | Cr      | —51 447,8 (14)    |
| 26 | 25 |    | Mn      | —48 239,8 (14)    |
| 25 | 26 |    | Fe      | —40 228 (17)      |
| 24 | 27 |    | Co      | —27 230 (c)       |
| 31 | 21 | 52 | Sc      | —40 140 (c)       |
| 30 | 22 |    | Ti      | —49 469 (10)      |
| 29 | 23 |    | V       | —51 438,9 (17)    |
| 28 | 24 |    | Cr      | —55 415,3 (15)    |
| 27 | 25 |    | Mn      | —50 704,2 (24)    |
| 26 | 26 |    | Fe      | —48 332 (12)      |
| 25 | 27 |    | Co      | —34 230 (c)       |
| 31 | 22 | 53 | Ti      | —46 890 (100)     |
| 30 | 23 |    | V       | —51 863 (25)      |
| 29 | 24 |    | Cr      | —55 283,7 (16)    |
| 28 | 25 |    | Mn      | —54 687,4 (15)    |

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 27 | 26 | 54 | Fe      | -50 944,2 (22)    |
| 26 | 27 |    | Co      | -42 640 (18)      |
| 25 | 28 |    | Ni      | -29 410 (180)     |
| 32 | 22 |    | Ti      | -45 330 (c)       |
| 31 | 23 |    | V       | -49 930 (100)     |
| 30 | 24 |    | Cr      | -56 931,3 (16)    |
| 29 | 25 |    | Mn      | -55 554,3 (18)    |
| 28 | 26 |    | Fe      | -56 251,4 (14)    |
| 27 | 27 |    | Co      | -48 009,6 (19)    |
| 26 | 28 |    | Ni      | -39 210 (c)       |
| 32 | 23 | 55 | V       | -49 010 (c)       |
| 31 | 24 |    | Cr      | -55 106,3 (17)    |
| 30 | 25 |    | Mn      | -57 710,0 (16)    |
| 29 | 26 |    | Fe      | -57 478,6 (15)    |
| 28 | 27 |    | Co      | -54 023,9 (16)    |
| 27 | 28 |    | Ni      | -45 334 (11)      |
| 26 | 29 |    | Cu      | -31 530 (c)       |
| 33 | 23 | 56 | V       | -46 210 (c)       |
| 32 | 24 |    | Cr      | -55 265 (30)      |
| 31 | 25 |    | Mn      | -56 908,8 (17)    |
| 30 | 26 |    | Fe      | -60 604,1 (14)    |
| 29 | 27 |    | Co      | -56 036,7 (24)    |
| 28 | 28 |    | Ni      | -53 902 (11)      |
| 27 | 29 |    | Cu      | -38 500 (c)       |
| 33 | 24 | 57 | Cr      | -52 790 (c)       |
| 32 | 25 |    | Mn      | -57 487 (8)       |
| 31 | 26 |    | Fe      | -60 179,0 (14)    |
| 30 | 27 |    | Co      | -59 342,4 (15)    |
| 29 | 28 |    | Ni      | -56 099 (7)       |
| 28 | 29 |    | Cu      | -47 620 (c)       |
| 27 | 30 |    | Zn      | -32 630 (130)     |
| 34 | 24 | 58 | Cr      | -52 050 (c)       |
| 33 | 25 |    | Mn      | -56 210 (100)     |
| 32 | 26 |    | Fe      | -62 151,8 (16)    |
| 31 | 27 |    | Co      | -59 844,0 (18)    |
| 30 | 28 |    | Ni      | -60 224,3 (15)    |
| 29 | 29 |    | Cu      | -51 661,7 (28)    |
| 28 | 30 |    | Zn      | -42 260 (c)       |
| 34 | 25 | 59 | Mn      | -55 478 (30)      |
| 33 | 26 |    | Fe      | -60 661,4 (26)    |
| 32 | 27 |    | Co      | -62 226,4 (15)    |
| 31 | 28 |    | Ni      | -61 152,9 (15)    |
| 30 | 29 |    | Cu      | -56 352,2 (21)    |
| 29 | 30 |    | Zn      | -47 590 (c)       |
| 35 | 25 | 60 | Mn      | -52 950 (c)       |
| 34 | 26 |    | Fe      | -61 437 (10)      |
| 33 | 27 |    | Co      | -61 646,6 (15)    |
| 32 | 28 |    | Ni      | -64 470,2 (15)    |
| 31 | 29 |    | Cu      | -58 343,3 (25)    |
| 30 | 30 |    | Zn      | -54 184 (11)      |
| 35 | 26 | 61 | Fe      | -59 010 (70)      |
| 34 | 27 |    | Co      | -62 897,0 (17)    |
| 33 | 28 |    | Ni      | -64 219,1 (15)    |
| 32 | 29 |    | Cu      | -61 980,7 (20)    |
| 31 | 30 |    | Zn      | -56 580 (200)     |
| 30 | 31 |    | Ga      | -47 750 (c)       |
| 36 | 26 | 62 | Fe      | -58 930 (50)      |
| 35 | 27 |    | Co      | -61 504 (14)      |
| 34 | 28 |    | Ni      | -66 745,4 (15)    |
| 33 | 29 |    | Cu      | -62 796 (5)       |

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 32 | 30 | 63 | Zn      | -61 169 (10)      |
| 31 | 31 |    | Ga      | -51 770 (c)       |
| 37 | 27 |    | Co      | -61 850 (19)      |
| 36 | 28 |    | Ni      | -65 512,6 (115)   |
| 35 | 29 |    | Cu      | -65 578,5 (15)    |
| 34 | 30 |    | Zn      | -62 211,1 (22)    |
| 33 | 31 |    | Ga      | -56 690 (100)     |
| 32 | 32 |    | Ge      | -47 550 (c)       |
| 37 | 27 | 64 | Co      | -59 791 (20)      |
| 36 | 28 |    | Ni      | -67 097,9 (16)    |
| 35 | 29 |    | Cu      | -65 423,0 (17)    |
| 34 | 30 |    | Zn      | -66 001,2 (19)    |
| 33 | 31 |    | Ga      | -58 836 (8)       |
| 32 | 32 |    | Ge      | -54 430 (250)     |
| 37 | 28 | 65 | Ni      | -65 124,5 (17)    |
| 36 | 29 |    | Cu      | -67 261,5 (20)    |
| 35 | 30 |    | Zn      | -65 909,6 (20)    |
| 34 | 31 |    | Ga      | -62 653,8 (22)    |
| 33 | 32 |    | Ge      | -56 410 (100)     |
| 32 | 33 |    | As      | -47 150 (c)       |
| 38 | 28 | 66 | Ni      | -66 021 (19)      |
| 37 | 29 |    | Cu      | -66 256,7 (21)    |
| 36 | 30 |    | Zn      | -68 898,3 (16)    |
| 35 | 31 |    | Ga      | -63 723,3 (34)    |
| 34 | 32 |    | Ge      | -61 621 (13)      |
| 33 | 33 |    | As      | -51 520 (c)       |
| 39 | 28 | 67 | Ni      | -63 470 (90)      |
| 38 | 29 |    | Cu      | -67 305 (8)       |
| 37 | 30 |    | Zn      | -67 879,6 (16)    |
| 36 | 31 |    | Ga      | -66 878,5 (18)    |
| 35 | 32 |    | Ge      | -62 450 (50)      |
| 34 | 33 |    | As      | -56 650 (c)       |
| 33 | 34 |    | Se      | -47 080 (c)       |
| 39 | 29 | 68 | Cu      | -65 390 (50)      |
| 38 | 30 |    | Zn      | -70 006,3 (17)    |
| 37 | 31 |    | Ga      | -67 085,2 (21)    |
| 36 | 32 |    | Ge      | -66 972 (12)      |
| 35 | 33 |    | As      | -58 770 (c)       |
| 34 | 34 |    | Se      | -54 170 (c)       |
| 40 | 29 | 69 | Cu      | -65 940 (70)      |
| 39 | 30 |    | Zn      | -68 417,0 (18)    |
| 38 | 31 |    | Ga      | -69 321,5 (31)    |
| 37 | 32 |    | Ge      | -67 096 (4)       |
| 36 | 33 |    | As      | -63 120 (40)      |
| 35 | 34 |    | Se      | -56 300 (40)      |
| 34 | 35 |    | Br      | -45 620 (c)       |
| 41 | 29 | 70 | Cu      | -63 390 (110)     |
| 40 | 30 |    | Zn      | -69 559,9 (34)    |
| 39 | 31 |    | Ga      | -68 905,2 (32)    |
| 38 | 32 |    | Ge      | -70 561,4 (18)    |
| 37 | 33 |    | As      | -64 339 (20)      |
| 36 | 34 |    | Se      | -61 590 (200)     |
| 35 | 35 |    | Br      | -51 140 (c)       |
| 41 | 30 | 71 | Zn      | -67 324 (10)      |
| 40 | 31 |    | Ga      | -70 141,5 (26)    |
| 39 | 32 |    | Ge      | -69 905,8 (21)    |
| 38 | 33 |    | As      | -67 893 (4)       |
| 37 | 34 |    | Se      | -63 090 (c)       |
| 36 | 35 |    | Br      | -56 490 (c)       |
| 35 | 36 |    | Kr      | -46 500 (c)       |

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 42 | 30 | 72 | Zn      | —68 134 (6)       |
| 41 | 31 |    | Ga      | —68 591,0 (28)    |
| 40 | 32 |    | Ge      | —72 582,6 (20)    |
| 39 | 33 |    | As      | —68 232 (7)       |
| 38 | 34 |    | Se      | —67 894 (12)      |
| 37 | 35 |    | Br      | —58 930 (c)       |
| 36 | 36 | 73 | Kr      | —53 870 (c)       |
| 43 | 30 |    | Zn      | —65 030 (200)     |
| 42 | 31 |    | Ga      | —69 730 (40)      |
| 41 | 32 |    | Ge      | —71 293,5 (19)    |
| 40 | 33 |    | As      | —70 949 (4)       |
| 39 | 34 |    | Se      | —68 209 (11)      |
| 38 | 35 | 74 | Br      | —63 670 (220)     |
| 37 | 36 |    | Kr      | —56 980 (140)     |
| 44 | 30 |    | Zn      | —65 670 (140)     |
| 43 | 31 |    | Ga      | —68 020 (100)     |
| 42 | 32 |    | Ge      | —73 422,1 (19)    |
| 41 | 33 |    | As      | —70 859,7 (25)    |
| 40 | 34 | 75 | Se      | —72 212,7 (26)    |
| 39 | 35 |    | Br      | —65 295 (15)      |
| 38 | 36 |    | Kr      | —62 020 (100)     |
| 45 | 30 |    | Zn      | —62 460 (c)       |
| 44 | 31 |    | Ga      | —68 560 (200)     |
| 43 | 32 |    | Ge      | —71 856,1 (24)    |
| 42 | 33 | 76 | As      | —73 033,9 (23)    |
| 41 | 34 |    | Se      | —72 169,0 (24)    |
| 40 | 35 |    | Br      | —69 159 (20)      |
| 39 | 36 |    | Kr      | —64 160 (c)       |
| 38 | 37 |    | Rb      | —57 510 (600)     |
| 46 | 30 | 77 | Zn      | —62 550 (170)     |
| 45 | 31 |    | Ga      | —66 440 (150)     |
| 44 | 32 |    | Ge      | —73 213,5 (25)    |
| 43 | 33 |    | As      | —72 290,6 (23)    |
| 42 | 34 |    | Se      | —75 259,2 (25)    |
| 41 | 35 | 78 | Br      | —73 103 (15)      |
| 40 | 36 |    | Kr      | —69 100 (200)     |
| 39 | 37 |    | Rb      | —60 610 (270)     |
| 47 | 30 |    | Zn      | —58 910 (c)       |
| 46 | 31 |    | Ga      | —66 410 (c)       |
| 45 | 32 |    | Ge      | —71 214,3 (26)    |
| 44 | 33 | 79 | As      | —73 915,7 (37)    |
| 43 | 34 |    | Se      | —74 606,1 (25)    |
| 42 | 35 |    | Br      | —73 241,5 (38)    |
| 41 | 36 |    | Kr      | —70 236 (30)      |
| 40 | 37 |    | Rb      | —65 110 (120)     |
| 39 | 38 |    | Sr      | —57 960 (280)     |
| 48 | 30 | 80 | Zn      | —58 080 (320)     |
| 47 | 31 |    | Ga      | —63 680 (200)     |
| 46 | 32 |    | Ge      | —71 760 (70)      |
| 45 | 33 |    | As      | —72 740 (70)      |
| 44 | 34 |    | Se      | —77 031,5 (26)    |
| 43 | 35 | 81 | Br      | —73 458 (5)       |
| 42 | 36 |    | Kr      | —74 150 (8)       |
| 41 | 37 |    | Rb      | —67 090 (180)     |
| 40 | 38 |    | Sr      | —63 850 (c)       |
| 48 | 31 | 82 | Ga      | —62 810 (170)     |
| 47 | 32 |    | Ge      | —69 570 (150)     |
| 46 | 33 |    | As      | —73 720 (50)      |
| 45 | 34 |    | Se      | —75 920,6 (39)    |

| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 44 | 35 | 80 | Br      | —76 070,0 (36)    |
| 43 | 36 |    | Kr      | —74 439 (9)       |
| 42 | 37 |    | Rb      | —70 860 (110)     |
| 41 | 38 |    | Sr      | —65 460 (c)       |
| 49 | 31 |    | Ga      | —59 530 (c)       |
| 48 | 32 |    | Ge      | —69 430 (310)     |
| 47 | 33 | 81 | As      | —72 060 (300)     |
| 46 | 34 |    | Se      | —77 761,3 (35)    |
| 45 | 35 |    | Br      | —75 891,0 (36)    |
| 44 | 36 |    | Kr      | —77 897 (11)      |
| 43 | 37 |    | Rb      | —72 190 (23)      |
| 42 | 38 |    | Sr      | —70 390 (c)       |
| 49 | 32 | 82 | Ge      | —66 340 (c)       |
| 48 | 33 |    | As      | —72 640 (100)     |
| 47 | 34 |    | Se      | —76 391,0 (37)    |
| 46 | 35 |    | Br      | —77 976 (6)       |
| 45 | 36 |    | Kr      | —77 707 (18)      |
| 44 | 37 | 83 | Rb      | —75 445 (35)      |
| 43 | 38 |    | Sr      | —71 460 (50)      |
| 50 | 32 |    | Ge      | —65 790 (c)       |
| 49 | 33 |    | As      | —70 190 (c)       |
| 48 | 34 |    | Se      | —77 586 (10)      |
| 47 | 35 |    | Br      | —77 498 (6)       |
| 46 | 36 | 84 | Kr      | —80 591 (6)       |
| 45 | 37 |    | Rb      | —76 213 (20)      |
| 44 | 38 |    | Sr      | —75 999 (9)       |
| 43 | 39 |    | Y       | —67 910 (c)       |
| 50 | 33 |    | As      | —69 950 (220)     |
| 49 | 34 |    | Se      | —75 410 (32)      |
| 48 | 35 | 85 | Br      | —79 025 (15)      |
| 47 | 36 |    | Kr      | —79 984,6 (39)    |
| 46 | 37 |    | Rb      | —78 987 (32)      |
| 45 | 38 |    | Sr      | —76 737 (30)      |
| 44 | 39 |    | Y       | —72 440 (c)       |
| 51 | 33 | 86 | As      | —66 160 (c)       |
| 50 | 34 |    | Se      | —75 942 (18)      |
| 49 | 35 |    | Br      | —77 759 (26)      |
| 48 | 36 |    | Kr      | —82 431,9 (36)    |
| 47 | 37 |    | Rb      | —79 752 (4)       |
| 46 | 38 | 87 | Sr      | —80 641 (4)       |
| 45 | 39 |    | Y       | —73 692 (30)      |
| 44 | 40 |    | Zr      | —71 440 (c)       |
| 51 | 34 |    | Se      | —72 570 (c)       |
| 50 | 35 |    | Br      | —78 670 (100)     |
| 49 | 36 |    | Kr      | —81 471,8 (37)    |
| 48 | 37 | 88 | Rb      | —82 158,8 (33)    |
| 47 | 38 |    | Sr      | —81 095 (7)       |
| 46 | 39 |    | Y       | —77 835 (12)      |
| 45 | 40 |    | Zr      | —73 130 (c)       |
| 52 | 34 | 89 | Se      | —70 860 (c)       |
| 51 | 35 |    | Br      | —75 960 (400)     |
| 50 | 36 |    | Kr      | —83 263 (5)       |
| 49 | 37 |    | Rb      | —82 737,7 (32)    |
| 48 | 38 |    | Sr      | —84 512,1 (28)    |
| 47 | 39 | 90 | Y       | —79 239 (10)      |
| 46 | 40 |    | Zr      | —77 940 (c)       |
| 45 | 41 |    | Nb      | —69 340 (c)       |
| 52 | 35 |    | Br      | —74 210 (c)       |
| 51 | 36 |    | Kr      | —80 707 (5)       |
| 50 | 37 |    | Rb      | —84 595,7 (30)    |



| N  | Z  | A  | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|----|---------|-------------------|
| 49 | 38 | 88 | Sr      | —84 868,9 (27)    |
| 48 | 39 |    | Y       | —83 007,2 (30)    |
| 47 | 40 |    | Zr      | —79 430 (80)      |
| 46 | 41 |    | Nb      | —74 430 (c)       |
| 53 | 35 |    | Br      | —71 090 (c)       |
| 52 | 36 |    | Kr      | —79 686 (14)      |
| 51 | 37 |    | Rb      | —82 602 (12)      |
| 50 | 38 |    | Sr      | —87 910,6 (27)    |
| 49 | 39 |    | Y       | —84 298 (4)       |
| 48 | 40 |    | Zr      | —83 621 (10)      |
| 47 | 41 | 89 | Nb      | —76 420 (c)       |
| 46 | 42 |    | Mo      | —72 920 (c)       |
| 53 | 36 |    | Kr      | —76 790 (60)      |
| 52 | 37 |    | Rb      | —81 717 (13)      |
| 51 | 38 |    | Sr      | —86 203 (4)       |
| 50 | 39 |    | Y       | —87 695,3 (30)    |
| 49 | 40 |    | Zr      | —84 859,5 (32)    |
| 48 | 41 |    | Nb      | —80 621 (19)      |
| 47 | 42 |    | Mo      | —75 220 (c)       |
| 54 | 36 | 90 | Kr      | —75 180 (70)      |
| 53 | 37 |    | Rb      | —79 570 (60)      |
| 52 | 38 |    | Sr      | —85 934,7 (38)    |
| 51 | 39 |    | Y       | —86 480,7 (33)    |
| 50 | 40 |    | Zr      | —88 764,6 (29)    |
| 49 | 41 |    | Nb      | —82 654 (5)       |
| 48 | 42 |    | Mo      | —80 167 (6)       |
| 47 | 43 |    | Tc      | —70 970 (c)       |
| 55 | 36 | 91 | Kr      | —71 770 (110)     |
| 54 | 37 |    | Rb      | —77 970 (40)      |
| 53 | 38 |    | Sr      | —83 666 (5)       |
| 52 | 39 |    | Y       | —86 349,5 (35)    |
| 51 | 40 |    | Zr      | —87 892,5 (29)    |
| 50 | 41 |    | Nb      | —86 636,9 (38)    |
| 49 | 42 |    | Mo      | —82 199 (12)      |
| 48 | 43 |    | Tc      | —75 980 (200)     |
| 56 | 36 | 92 | Kr      | —69 150 (220)     |
| 55 | 37 |    | Rb      | —75 120 (200)     |
| 54 | 38 |    | Sr      | —82 892 (34)      |
| 53 | 39 |    | Y       | —84 822 (16)      |
| 52 | 40 |    | Zr      | —88 456,1 (28)    |
| 51 | 41 |    | Nb      | —86 448,1 (34)    |
| 50 | 42 |    | Mo      | —86 807 (4)       |
| 49 | 43 |    | Tc      | —78 936 (26)      |
| 57 | 36 | 93 | Kr      | —64 920 (c)       |
| 56 | 37 |    | Rb      | —72 920 (170)     |
| 55 | 38 |    | Sr      | —80 280 (150)     |
| 54 | 39 |    | Y       | —84 227 (20)      |
| 53 | 40 |    | Zr      | —87 116,7 (28)    |
| 52 | 41 |    | Nb      | —87 209,0 (29)    |
| 51 | 42 |    | Mo      | —86 803 (4)       |
| 50 | 43 |    | Tc      | —83 610 (5)       |
| 49 | 44 |    | Ru      | —77 310 (c)       |
| 57 | 37 | 94 | Rb      | —69 460 (c)       |
| 56 | 38 |    | Sr      | —78 960 (70)      |
| 55 | 39 |    | Y       | —82 382 (12)      |
| 54 | 40 |    | Zr      | —87 263,9 (31)    |
| 53 | 41 |    | Nb      | —86 367,1 (30)    |
| 52 | 42 |    | Mo      | —88 412,3 (34)    |
| 51 | 43 |    | Tc      | —84 156 (6)       |
| 50 | 44 |    | Ru      | —82 571 (13)      |

| N  | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|-----|---------|-------------------|
| 58 | 37 | 95  | Rb      | —66 550 (310)     |
| 57 | 38 |     | Sr      | —75 140 (90)      |
| 56 | 39 |     | Y       | —81 233 (20)      |
| 55 | 40 |     | Zr      | —85 663,4 (34)    |
| 54 | 41 |     | Nr      | —86 786,5 (25)    |
| 53 | 42 |     | Mo      | —87 712,1 (24)    |
| 52 | 43 |     | Tc      | —86 013 (8)       |
| 51 | 44 |     | Ru      | —83 452 (12)      |
| 50 | 45 |     | Rh      | —78 340 (150)     |
| 59 | 37 | 96  | Rb      | —62 770 (c)       |
| 58 | 38 |     | Sr      | —73 070 (140)     |
| 57 | 39 |     | Y       | —78 430 (100)     |
| 56 | 40 |     | Zr      | —85 444,7 (37)    |
| 55 | 41 |     | Nb      | —85 608 (5)       |
| 54 | 42 |     | Mo      | —88 794,9 (24)    |
| 53 | 43 |     | Tc      | —85 821 (6)       |
| 52 | 44 |     | Ru      | —86 075 (9)       |
| 51 | 45 |     | Rh      | —79 633 (13)      |
| 59 | 38 | 97  | Sr      | —69 080 (c)       |
| 58 | 39 |     | Y       | —76 280 (130)     |
| 57 | 40 |     | Zr      | —82 954,2 (37)    |
| 56 | 41 |     | Nb      | —85 611,6 (31)    |
| 55 | 42 |     | Mo      | —85 544,5 (24)    |
| 54 | 43 |     | Tc      | —87 224 (5)       |
| 53 | 44 |     | Ru      | —86 070 (100)     |
| 52 | 45 |     | Rh      | —82 560 (100)     |
| 51 | 46 |     | Pd      | —77 760 (c)       |
| 60 | 38 | 98  | Sr      | —67 380 (c)       |
| 59 | 39 |     | Y       | —73 190 (c)       |
| 58 | 40 |     | Zr      | —81 291 (20)      |
| 57 | 41 |     | Nb      | —83 530 (6)       |
| 56 | 42 |     | Mo      | —88 115,4 (24)    |
| 55 | 43 |     | Tc      | —86 434 (6)       |
| 54 | 44 |     | Ru      | —88 226 (6)       |
| 53 | 45 |     | Rh      | —83 168 (12)      |
| 52 | 46 |     | Pd      | —81 270 (c)       |
| 60 | 39 | 99  | Y       | —71 500 (220)     |
| 59 | 40 |     | Zr      | —77 890 (100)     |
| 58 | 41 |     | Nb      | —82 346 (16)      |
| 57 | 42 |     | Mo      | —85 969,5 (24)    |
| 56 | 43 |     | Tc      | —87 326,2 (25)    |
| 55 | 44 |     | Ru      | —87 619,8 (26)    |
| 54 | 45 |     | Rh      | —85 517 (10)      |
| 53 | 46 |     | Pd      | —82 112 (23)      |
| 52 | 47 |     | Ag      | —76 510 (c)       |
| 60 | 40 | 100 | Zr      | —76 600 (200)     |
| 59 | 41 |     | Nb      | —79 960 (130)     |
| 58 | 42 |     | Mo      | —86 189 (6)       |
| 57 | 43 |     | Tc      | —86 018,8 (27)    |
| 56 | 44 |     | Ru      | —89 221,6 (26)    |
| 55 | 45 |     | Rh      | —85 592 (20)      |
| 54 | 46 |     | Pd      | —85 230 (15)      |
| 53 | 47 |     | Ag      | —77 930 (400)     |
| 61 | 40 | 101 | Zr      | —73 050 (c)       |
| 60 | 41 |     | Nb      | —78 950 (100)     |
| 59 | 42 |     | Mo      | —83 516 (6)       |
| 58 | 43 |     | Tc      | —86 327 (24)      |
| 57 | 44 |     | Ru      | —87 951,6 (29)    |
| 56 | 45 |     | Rh      | —87 410 (18)      |
| 55 | 46 |     | Pd      | —85 428 (18)      |
| 54 | 47 |     | Ag      | —81 330 (c)       |
| 53 | 48 |     | Cd      | —75 530 (c)       |

| N  | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|-----|---------|-------------------|
| 61 | 41 | 102 | Nb      | —76 360 (c)       |
| 60 | 42 |     | Mo      | —83 562 (21)      |
| 59 | 43 |     | Tc      | —84 600 (c)       |
| 58 | 44 |     | Ru      | —89 100,5 (29)    |
| 57 | 45 |     | Rh      | —86 777 (7)       |
| 56 | 46 |     | Pd      | —87 925 (9)       |
| 55 | 47 |     | Ag      | —82 330 (50)      |
| 54 | 48 | 103 | Cd      | —79 430 (c)       |
| 53 | 49 |     | In      | —70 130 (c)       |
| 62 | 41 |     | Nb      | —75 410 (c)       |
| 61 | 42 |     | Mo      | —80 610 (c)       |
| 60 | 43 |     | Tc      | —84 910 (100)     |
| 59 | 44 |     | Ru      | —87 261,4 (30)    |
| 58 | 45 |     | Rh      | —88 024 (4)       |
| 57 | 46 |     | Pd      | —87 478 (9)       |
| 56 | 47 | 104 | Ag      | —84 800 (50)      |
| 55 | 48 |     | Cd      | —80 600 (140)     |
| 54 | 49 |     | In      | —74 100 (c)       |
| 62 | 42 |     | Mo      | —80 500 (c)       |
| 61 | 43 |     | Tc      | —82 700 (c)       |
| 60 | 44 |     | Ru      | —88 099 (6)       |
| 59 | 45 |     | Rh      | —86 952 (4)       |
| 58 | 46 | 105 | Pd      | —89 400 (5)       |
| 57 | 47 |     | Ag      | —85 150 (30)      |
| 56 | 48 |     | Cd      | —83 850 (c)       |
| 55 | 49 |     | In      | —75 850 (c)       |
| 54 | 50 |     | Sn      | —71 150 (c)       |
| 63 | 42 |     | Mo      | —77 140 (c)       |
| 62 | 43 |     | Tc      | —82 540 (200)     |
| 61 | 44 | 106 | Ru      | —85 938 (6)       |
| 60 | 45 |     | Rh      | —87 855 (6)       |
| 59 | 46 |     | Pd      | —88 422 (5)       |
| 58 | 47 |     | Ag      | —87 075 (10)      |
| 57 | 48 |     | Cd      | —84 336 (11)      |
| 56 | 49 |     | In      | —79 340 (c)       |
| 55 | 50 |     | Sn      | —73 090 (c)       |
| 63 | 43 | 107 | Tc      | —80 030 (c)       |
| 62 | 44 |     | Ru      | —86 333 (10)      |
| 61 | 45 |     | Rh      | —86 372 (10)      |
| 60 | 46 |     | Pd      | —89 913 (5)       |
| 59 | 47 |     | Ag      | —86 929 (6)       |
| 58 | 48 |     | Cd      | —87 131 (6)       |
| 57 | 49 |     | In      | —80 586 (31)      |
| 56 | 50 | 108 | Sn      | —76 990 (c)       |
| 55 | 51 |     | Sb      | —66 190 (c)       |
| 64 | 43 |     | Ts      | —79 510 (c)       |
| 63 | 44 |     | Ru      | —83 710 (300)     |
| 62 | 45 |     | Rh      | —86 860 (40)      |
| 61 | 46 |     | Pd      | —88 371 (6)       |
| 60 | 47 |     | Ag      | —88 404 (6)       |
| 59 | 48 | 109 | Cd      | —86 987 (7)       |
| 58 | 49 |     | In      | —83 500 (150)     |
| 57 | 50 |     | Sn      | —78 400 (c)       |
| 56 | 51 |     | Sb      | —70 400 (c)       |
| 64 | 44 |     | Ru      | —83 820 (600)     |
| 63 | 45 |     | Rh      | —85 020 (600)     |
| 62 | 46 |     | Pd      | —89 523 (5)       |
| 61 | 47 | 110 | Ag      | —87 602 (6)       |
| 60 | 48 |     | Cd      | —89 251 (6)       |
| 59 | 49 |     | In      | —84 100 (80)      |
| 58 | 50 |     | Sn      | —81 900 (c)       |

| N  | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|-----|---------|-------------------|
| 57 | 51 | 109 | Sb      | —72 400 (c)       |
| 56 | 52 |     | Te      | —65 320 (c)       |
| 65 | 44 |     | Ru      | —80 810 (c)       |
| 64 | 45 |     | Rh      | —85 110 (c)       |
| 63 | 46 |     | Pd      | —87 606 (5)       |
| 62 | 47 |     | Ag      | —88 722 (4)       |
| 61 | 48 |     | Cd      | —88 540 (5)       |
| 60 | 49 | 110 | In      | —86 524 (10)      |
| 59 | 50 |     | Sn      | —82 620 (c)       |
| 58 | 51 |     | Sb      | —76 120 (c)       |
| 57 | 52 |     | Te      | —67 470 (c)       |
| 65 | 45 |     | Rh      | —82 930 (100)     |
| 64 | 46 |     | Pd      | —88 335 (20)      |
| 63 | 47 | 111 | Ag      | —87 456 (4)       |
| 62 | 48 |     | Cd      | —90 349 (4)       |
| 61 | 49 |     | In      | —86 409 (30)      |
| 60 | 50 |     | Sn      | —85 834 (16)      |
| 59 | 51 |     | Sb      | —77 430 (c)       |
| 58 | 52 |     | Te      | —71 760 (c)       |
| 66 | 45 |     | Rh      | —82 530 (c)       |
| 65 | 46 | 112 | Pd      | —86 030 (50)      |
| 64 | 47 |     | Ag      | —88 226 (5)       |
| 63 | 48 |     | Cd      | —89 254 (4)       |
| 62 | 49 |     | In      | —88 405 (11)      |
| 61 | 50 |     | Sn      | —85 941 (8)       |
| 60 | 51 |     | Sb      | —80 840 (c)       |
| 59 | 52 |     | Te      | —73 470 (70)      |
| 66 | 46 | 113 | Pd      | —86 326 (26)      |
| 65 | 47 |     | Ag      | —86 620 (29)      |
| 64 | 48 |     | Cd      | —90 577,9 (34)    |
| 63 | 49 |     | In      | —88 000 (7)       |
| 62 | 50 |     | Sn      | —88 658 (6)       |
| 61 | 51 |     | Sb      | —81 740 (100)     |
| 60 | 52 |     | Te      | —77 550 (c)       |
| 59 | 53 | 114 | I       | —67 440 (c)       |
| 67 | 46 |     | Pd      | —83 640 (c)       |
| 66 | 47 |     | Ag      | —87 040 (20)      |
| 65 | 48 |     | Cd      | —89 050,3 (35)    |
| 64 | 49 |     | In      | —89 372 (5)       |
| 63 | 50 |     | Sn      | —88 332 (5)       |
| 62 | 51 |     | Sb      | —84 443 (32)      |
| 61 | 52 | 115 | Te      | —78 540 (c)       |
| 60 | 53 |     | I       | —71 440 (c)       |
| 67 | 47 |     | Ag      | —85 160 (140)     |
| 66 | 48 |     | Cd      | —90 019,6 (33)    |
| 65 | 49 |     | In      | —88 576 (5)       |
| 64 | 50 |     | Sn      | —90 560 (4)       |
| 63 | 51 |     | Sb      | —84 870 (50)      |
| 62 | 52 | 116 | Te      | —82 190 (c)       |
| 61 | 53 |     | I       | —73 070 (c)       |
| 60 | 54 |     | Xe      | —67 090 (c)       |
| 68 | 47 |     | Ag      | —84 910 (100)     |
| 67 | 48 |     | Cd      | —88 093 (8)       |
| 66 | 49 |     | In      | —86 541 (8)       |
| 65 | 50 |     | Sn      | —90 035,1 (37)    |
| 64 | 51 | 117 | Sb      | —87 005 (20)      |
| 63 | 52 |     | Te      | —82 420 (50)      |
| 62 | 53 |     | I       | —76 620 (c)       |
| 61 | 54 |     | Xe      | —68 700 (c)       |

Продолжение табл. 39.1

| <i>N</i> | <i>Z</i> | <i>A</i> | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----------|----------|----------|---------|-------------------|
| 69       | 47       | 116      | Ag      | —82 620 (c)       |
| 68       | 48       |          | Cd      | —88 717,6 (37)    |
| 67       | 49       |          | In      | —88 253 (8)       |
| 66       | 50       |          | Sn      | —91 526,1 (36)    |
| 65       | 51       |          | Sb      | —86 930 (40)      |
| 64       | 52       |          | Te      | —85 370 (110)     |
| 63       | 53       |          | I       | —77 610 (170)     |
| 62       | 54       |          | Xe      | —73 270 (260)     |
| 61       | 55       |          | Cs      | —62 630 (c)       |
| 70       | 47       | 117      | Ag      | —82 240 (100)     |
| 69       | 48       |          | Cd      | —86 416 (13)      |
| 68       | 49       |          | In      | —88 944 (9)       |
| 67       | 50       |          | Sn      | —90 398,9 (35)    |
| 66       | 51       |          | Sb      | —88 654 (18)      |
| 65       | 52       |          | Te      | —85 164 (35)      |
| 64       | 53       |          | I       | —80 850 (110)     |
| 63       | 54       |          | Xe      | —74 480 (c)       |
| 62       | 55       |          | Cs      | —66 850 (c)       |
| 70       | 48       | 118      | Cd      | —86 707 (20)      |
| 69       | 49       |          | In      | —87 450 (300)     |
| 68       | 50       |          | Sn      | —91 653,6 (35)    |
| 67       | 51       |          | Sb      | —87 967 (5)       |
| 66       | 52       |          | Te      | —87 671 (24)      |
| 65       | 53       |          | I       | —81 370 (c)       |
| 64       | 54       |          | Xe      | —78 070 (c)       |
| 63       | 55       |          | Cs      | —68 670 (c)       |
| 71       | 48       | 119      | Cd      | —84 230 (300)     |
| 70       | 49       |          | In      | —87 730 (18)      |
| 69       | 50       |          | Sn      | —90 066,7 (35)    |
| 68       | 51       |          | Sb      | —89 483 (12)      |
| 67       | 52       |          | Te      | —87 189 (13)      |
| 66       | 53       |          | I       | —83 820 (100)     |
| 65       | 54       |          | Xe      | —78 830 (160)     |
| 64       | 55       |          | Cs      | —72 530 (c)       |
| 63       | 56       |          | Ba      | —64 530 (c)       |
| 72       | 48       | 120      | Cd      | —83 981 (30)      |
| 71       | 49       |          | In      | —85 700 (100)     |
| 70       | 50       |          | Sn      | —91 101,8 (35)    |
| 69       | 51       |          | Sb      | —88 421 (8)       |
| 68       | 52       |          | Te      | —89 404 (21)      |
| 67       | 53       |          | I       | —84 000 (200)     |
| 66       | 54       |          | Xe      | —82 050 (280)     |
| 65       | 55       |          | Cs      | —73 640 (320)     |
| 64       | 56       |          | Ba      | —69 050 (c)       |
| 72       | 49       | 121      | In      | —85 842 (28)      |
| 71       | 50       |          | Sn      | —89 201,8 (35)    |
| 70       | 51       |          | Sb      | —89 588,4 (35)    |
| 69       | 52       |          | Te      | —88 508 (15)      |
| 68       | 53       |          | I       | —86 140 (40)      |
| 67       | 54       |          | Xe      | —82 350 (110)     |
| 66       | 55       |          | Cs      | —77 150 (c)       |
| 65       | 56       |          | Ba      | —70 570 (410)     |
| 73       | 49       | 122      | In      | —83 600 (150)     |
| 72       | 50       |          | Sn      | —89 946 (4)       |
| 71       | 51       |          | Sb      | —88 323,3 (36)    |
| 70       | 52       |          | Te      | —90 304 (4)       |
| 69       | 53       |          | I       | —86 160 (40)      |
| 68       | 54       |          | Xe      | —85 160 (c)       |
| 67       | 55       |          | Cs      | —78 010 (c)       |
| 66       | 56       |          | Ba      | —74 260 (c)       |

Продолжение табл. 39.1

| <i>N</i> | <i>Z</i> | <i>A</i> | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----------|----------|----------|---------|-------------------|
| 74       | 49       | 123      | In      | —83 440 (40)      |
| 73       | 50       |          | Sn      | —87 821 (4)       |
| 72       | 51       |          | Sb      | —89 217,5 (38)    |
| 71       | 52       |          | Te      | —89 165,5 (38)    |
| 70       | 53       |          | I       | —87 970 (100)     |
| 69       | 54       |          | Xe      | —85 290 (100)     |
| 68       | 55       |          | Cs      | —80 890 (c)       |
| 67       | 56       |          | Ba      | —75 390 (c)       |
| 75       | 49       | 124      | In      | —81 100 (90)      |
| 74       | 50       |          | Sn      | —88 240 (5)       |
| 73       | 51       |          | Sb      | —87 613,4 (38)    |
| 72       | 52       |          | Te      | —90 518,3 (38)    |
| 71       | 53       |          | I       | —87 361 (5)       |
| 70       | 54       |          | Xe      | —87 450 (140)     |
| 69       | 55       |          | Cs      | —81 530 (480)     |
| 68       | 56       |          | Ba      | —78 750 (c)       |
| 76       | 49       | 125      | In      | —80 500 (300)     |
| 75       | 50       |          | Sn      | —85 902 (5)       |
| 74       | 51       |          | Sb      | —88 252 (5)       |
| 73       | 52       |          | Te      | —89 019 (4)       |
| 72       | 53       |          | I       | —88 841 (5)       |
| 71       | 54       |          | Xe      | —87 110 (40)      |
| 70       | 55       |          | Cs      | —84 040 (40)      |
| 69       | 56       |          | Ba      | —79 460 (250)     |
| 77       | 49       | 126      | In      | —77 900 (120)     |
| 76       | 50       |          | Sn      | —86 024 (12)      |
| 75       | 51       |          | Sb      | —86 402 (32)      |
| 74       | 52       |          | Te      | —90 066 (4)       |
| 73       | 53       |          | I       | —87 911 (6)       |
| 72       | 54       |          | Xe      | —89 162 (8)       |
| 71       | 55       |          | Cs      | —84 330 (140)     |
| 70       | 56       |          | Ba      | —52 560 (c)       |
| 78       | 49       | 127      | In      | —77 170 (130)     |
| 77       | 50       |          | Sn      | —83 600 (100)     |
| 76       | 51       |          | Sb      | —86 704 (7)       |
| 75       | 52       |          | Te      | —88 285 (5)       |
| 74       | 53       |          | I       | —88 980 (5)       |
| 73       | 54       |          | Xe      | —88 316 (6)       |
| 72       | 55       |          | Cs      | —86 206 (21)      |
| 71       | 56       |          | Ba      | —82 760 (100)     |
| 70       | 57       |          | La      | —77 760 (c)       |
| 79       | 49       | 128      | In      | —74 340 (250)     |
| 78       | 50       |          | Sn      | —83 440 (150)     |
| 77       | 51       |          | Sb      | —84 730 (150)     |
| 76       | 52       |          | Te      | —88 992,3 (39)    |
| 75       | 53       |          | I       | —87 734 (5)       |
| 74       | 54       |          | Xe      | —89 861,2 (16)    |
| 73       | 55       |          | Cs      | —85 935 (6)       |
| 72       | 56       |          | Ba      | —85 482 (20)      |
| 71       | 57       |          | La      | —78 680 (c)       |
| 80       | 49       | 129      | In      | —73 120 (180)     |
| 79       | 50       |          | Sn      | —80 640 (130)     |
| 78       | 51       |          | Sb      | —84 630 (22)      |
| 77       | 52       |          | Te      | —87 007 (4)       |
| 76       | 53       |          | I       | —88 505 (4)       |
| 75       | 54       |          | Xe      | —88 697,5 (20)    |
| 74       | 55       |          | Cs      | —87 563 (24)      |
| 73       | 56       |          | Ba      | —85 116 (19)      |
| 72       | 57       |          | La      | —81 120 (c)       |

| N  | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|-----|---------|-------------------|
| 81 | 49 | 130 | In      | -70 080 (c)       |
| 80 | 50 |     | Sn      | -80 380 (130)     |
| 79 | 51 |     | Sb      | -82 380 (80)      |
| 78 | 52 |     | Te      | -87 348 (5)       |
| 77 | 53 |     | I       | -86 897 (10)      |
| 76 | 54 |     | Xe      | -89 881,1 (16)    |
| 75 | 55 |     | Cs      | -86 863 (12)      |
| 74 | 56 | 131 | Ba      | -87 303 (12)      |
| 73 | 57 |     | La      | -81 600 (c)       |
| 81 | 50 |     | Sn      | -77 480 (c)       |
| 80 | 51 |     | Sb      | -82 100 (c)       |
| 79 | 52 |     | Te      | -85 201 (5)       |
| 78 | 53 |     | I       | -87 451 (5)       |
| 77 | 54 |     | Xe      | -88 421 (5)       |
| 76 | 55 |     | Cs      | -88 066 (8)       |
| 75 | 56 | 132 | Ba      | -86 726 (19)      |
| 74 | 57 |     | La      | -83 770 (100)     |
| 73 | 58 |     | Ce      | -79 470 (c)       |
| 82 | 50 |     | Sn      | -76 390 (220)     |
| 81 | 51 |     | Sb      | -79 610 (200)     |
| 80 | 52 |     | Te      | -85 213 (21)      |
| 79 | 53 |     | I       | -85 706 (21)      |
| 78 | 54 | 133 | Xe      | -89 286 (5)       |
| 77 | 55 |     | Cs      | -87 175 (23)      |
| 76 | 56 |     | Ba      | -88 453 (10)      |
| 75 | 57 |     | La      | -83 740 (50)      |
| 74 | 58 |     | Ce      | -82 340 (c)       |
| 82 | 51 |     | Sb      | -78 980 (210)     |
| 81 | 52 |     | Te      | -82 930 (70)      |
| 80 | 53 | 134 | I       | -85 902 (31)      |
| 79 | 54 |     | Xe      | -87 662 (9)       |
| 78 | 55 |     | Cs      | -88 089 (8)       |
| 77 | 56 |     | Ba      | -87 569 (9)       |
| 76 | 57 |     | La      | -85 570 (c)       |
| 75 | 58 |     | Ce      | -82 170 (c)       |
| 74 | 59 |     | Pr      | -77 970 (c)       |
| 83 | 51 | 135 | Sb      | -73 870 (c)       |
| 82 | 52 |     | Te      | -82 670 (c)       |
| 81 | 53 |     | I       | -83 970 (60)      |
| 80 | 54 |     | Xe      | -88 125 (7)       |
| 79 | 55 |     | Cs      | -86 909 (8)       |
| 78 | 56 |     | Ba      | -88 968 (8)       |
| 77 | 57 |     | La      | -85 268 (31)      |
| 76 | 58 | 136 | Ce      | -84 770 (c)       |
| 75 | 59 |     | Pr      | -78 470 (c)       |
| 83 | 52 |     | Te      | -77 600 (250)     |
| 82 | 53 |     | I       | -83 796 (29)      |
| 81 | 54 |     | Xe      | -86 506 (11)      |
| 80 | 55 |     | Cs      | -87 665 (9)       |
| 79 | 56 |     | Ba      | -87 870 (7)       |
| 78 | 57 | 137 | La      | -86 670 (12)      |
| 77 | 58 |     | Ce      | -84 550 (100)     |
| 76 | 59 |     | Pr      | -80 990 (140)     |
| 75 | 60 |     | Nd      | -76 290 (c)       |
| 84 | 52 |     | Te      | -74 830 (c)       |
| 83 | 53 |     | I       | -79 430 (100)     |
| 82 | 54 |     | Xe      | -86 425 (8)       |
| 81 | 55 | 138 | Cs      | -86 358 (8)       |
| 80 | 56 |     | Ba      | -88 906 (7)       |
| 79 | 57 |     | La      | -86 040 (70)      |
| 78 | 58 |     | Ce      | -86 500 (40)      |
| 77 | 59 |     | Pr      | -81 400 (60)      |
| 76 | 60 |     | Nd      | -79 190 (70)      |

| N  | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|-----|---------|-------------------|
| 84 | 53 | 137 | I       | -76 720 (200)     |
| 83 | 54 |     | Xe      | -82 215 (22)      |
| 82 | 55 |     | Cs      | -86 560 (7)       |
| 81 | 56 |     | Ba      | -87 733 (7)       |
| 80 | 57 |     | La      | -87 130 (c)       |
| 79 | 58 |     | Ce      | -85 910 (c)       |
| 78 | 59 |     | Pr      | -83 210 (c)       |
| 77 | 60 | 138 | Nd      | -79 410 (c)       |
| 76 | 61 |     | Pm      | -74 210 (c)       |
| 85 | 53 |     | I       | -71 730 (c)       |
| 84 | 54 |     | Xe      | -80 030 (c)       |
| 83 | 55 |     | Cs      | -82 770 (c)       |
| 82 | 56 |     | Ba      | -88 273 (7)       |
| 81 | 57 |     | La      | -86 524 (7)       |
| 80 | 58 | 139 | Ce      | -87 565 (13)      |
| 79 | 59 |     | Pr      | -83 128 (16)      |
| 78 | 60 |     | Nd      | -82 030 (c)       |
| 77 | 61 |     | Pm      | -75 030 (c)       |
| 85 | 54 |     | Xe      | -75 750 (90)      |
| 84 | 55 |     | Cs      | -80 630 (70)      |
| 83 | 56 |     | Ba      | -84 925 (7)       |
| 82 | 57 | 140 | La      | -87 231 (6)       |
| 81 | 58 |     | Ce      | -86 966 (8)       |
| 80 | 59 |     | Pr      | -84 854 (13)      |
| 79 | 60 |     | Nd      | -82 050 (50)      |
| 78 | 61 |     | Pm      | -77 500 (210)     |
| 77 | 62 |     | Sm      | -72 300 (450)     |
| 86 | 54 | 141 | Xe      | -73 180 (260)     |
| 85 | 55 |     | Cs      | -77 240 (250)     |
| 84 | 56 |     | Ba      | -83 285 (12)      |
| 83 | 57 |     | La      | -84 320 (6)       |
| 82 | 58 |     | Ce      | -88 081 (6)       |
| 81 | 59 |     | Pr      | -84 693 (8)       |
| 80 | 60 | 142 | Nd      | -84 220 (40)      |
| 79 | 61 |     | Pm      | -78 180 (110)     |
| 78 | 62 |     | Sm      | -75 480 (c)       |
| 87 | 54 |     | Xe      | -69 000 (140)     |
| 86 | 55 |     | Cs      | -75 000 (100)     |
| 85 | 56 |     | Ba      | -79 980 (60)      |
| 84 | 57 | 143 | La      | -83 008 (31)      |
| 83 | 58 |     | Ce      | -85 438 (6)       |
| 82 | 59 |     | Pr      | -86 018 (6)       |
| 81 | 60 |     | Nd      | -84 203 (10)      |
| 80 | 61 |     | Pm      | -80 470 (40)      |
| 79 | 62 |     | Sm      | -75 910 (60)      |
| 78 | 63 |     | Eu      | -69 880 (100)     |
| 88 | 54 | 144 | Xe      | -66 050 (170)     |
| 87 | 55 |     | Cs      | -70 950 (130)     |
| 86 | 56 |     | Ba      | -77 820 (100)     |
| 85 | 57 |     | La      | -80 018 (9)       |
| 84 | 58 |     | Ce      | -84 535 (6)       |
| 83 | 59 |     | Pr      | -83 790 (6)       |
| 82 | 60 | 145 | Nd      | -85 949 (5)       |
| 81 | 61 |     | Pm      | -81 060 (60)      |
| 80 | 62 |     | Sm      | -78 978 (16)      |
| 79 | 63 |     | Eu      | -71 480 (c)       |
| 88 | 55 |     | Cs      | -68 360 (c)       |
| 87 | 56 |     | Ba      | -74 010 (c)       |
| 86 | 57 |     | La      | -78 310 (80)      |
| 85 | 58 | 146 | Ce      | -81 610 (6)       |
| 84 | 59 |     | Pr      | -83 065 (6)       |

| <i>N</i> | <i>Z</i> | <i>A</i> | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----------|----------|----------|---------|-------------------|
| 83       | 60       | 144      | Nd      | —84 000 (5)       |
| 82       | 61       |          | Pm      | —82 959 (7)       |
| 81       | 62       |          | Sm      | —79 511 (11)      |
| 80       | 63       |          | Eu      | —74 410 (50)      |
| 79       | 64       |          | Gd      | —68 510 (c)       |
| 89       | 55       |          | Cs      | —63 930 (c)       |
| 88       | 56       |          | Ba      | —72 030 (c)       |
| 87       | 57       |          | La      | —74 930 (c)       |
| 86       | 58       |          | Ce      | —80 431 (6)       |
| 85       | 59       |          | Pr      | —80 750 (6)       |
| 84       | 60       | 145      | Nd      | —83 746 (5)       |
| 83       | 61       |          | Pm      | —81 416 (7)       |
| 82       | 62       |          | Sm      | —81 964 (6)       |
| 81       | 63       |          | Eu      | —75 636 (30)      |
| 80       | 64       |          | Gd      | —71 940 (c)       |
| 90       | 55       |          | Cs      | —61 720 (c)       |
| 89       | 56       |          | Ba      | —67 820 (c)       |
| 88       | 57       |          | La      | —72 920 (c)       |
| 87       | 58       |          | Ce      | —77 120 (90)      |
| 86       | 59       |          | Pr      | —79 625 (11)      |
| 85       | 60       | 146      | Nd      | —81 430 (5)       |
| 84       | 61       |          | Pm      | —81 270 (6)       |
| 83       | 62       |          | Sm      | —80 656 (6)       |
| 82       | 63       |          | Eu      | —77 936 (16)      |
| 81       | 64       |          | Cd      | —72 940 (c)       |
| 80       | 65       |          | Tb      | —66 240 (c)       |
| 90       | 56       |          | Ba      | —65 560 (c)       |
| 89       | 57       |          | La      | —69 460 (c)       |
| 88       | 58       |          | Ce      | —75 760 (120)     |
| 87       | 59       |          | Pr      | —76 840 (100)     |
| 86       | 60       | 147      | Nd      | —80 923 (5)       |
| 85       | 61       |          | Pm      | —79 442 (8)       |
| 84       | 62       |          | Sm      | —80 984 (8)       |
| 83       | 63       |          | Eu      | —77 111 (11)      |
| 82       | 64       |          | Gd      | —75 910 (c)       |
| 81       | 65       |          | Tb      | —67 810 (c)       |
| 90       | 57       |          | La      | —67 540 (c)       |
| 89       | 58       |          | Ce      | —72 240 (r)       |
| 88       | 59       |          | Pr      | —75 440 (200)     |
| 87       | 60       |          | Nd      | —78 144 (5)       |
| 86       | 61       | 148      | Pm      | —79 040 (5)       |
| 85       | 62       |          | Sm      | —79 265 (5)       |
| 84       | 63       |          | Eu      | —77 535 (8)       |
| 83       | 64       |          | Gd      | —75 207 (26)      |
| 22       | 65       |          | Tb      | —70 510 (c)       |
| 81       | 66       |          | Dy      | —64 210 (c)       |
| 90       | 58       |          | Ce      | —70 710 (c)       |
| 89       | 59       |          | Pr      | —72 510 (c)       |
| 88       | 60       |          | Nd      | —77 407 (5)       |
| 87       | 61       |          | Pm      | —76 870 (10)      |
| 86       | 62       | 149      | Sm      | —79 335 (5)       |
| 85       | 63       |          | Eu      | —76 235 (22)      |
| 84       | 64       |          | Gd      | —76 268 (6)       |
| 83       | 65       |          | Tb      | —70 640 (80)      |
| 82       | 66       |          | Dy      | —67 770 (c)       |
| 91       | 58       |          | Ce      | —67 470 (c)       |
| 90       | 59       |          | Pr      | —71 310 (200)     |
| 89       | 60       |          | Nb      | —74 374 (5)       |
| 88       | 61       |          | Pm      | —76 063 (6)       |
| 87       | 62       |          | Sm      | —77 135 (5)       |
| 86       | 63       |          | Eu      | —76 439 (7)       |

| <i>N</i> | <i>Z</i> | <i>A</i> | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----------|----------|----------|---------|-------------------|
| 85       | 64       | 150      | Gd      | —75 131 (7)       |
| 84       | 65       |          | Tb      | —71 434 (16)      |
| 83       | 66       |          | Dy      | —67 530 (c)       |
| 82       | 67       |          | Ho      | —61 530 (c)       |
| 91       | 59       |          | Pr      | —68 680 (c)       |
| 90       | 60       |          | Nd      | —73 682 (6)       |
| 89       | 61       |          | Pm      | —73 550 (80)      |
| 88       | 62       |          | Sm      | —77 049 (5)       |
| 87       | 63       |          | Eu      | —74 756 (11)      |
| 86       | 64       |          | Gd      | —75 765 (11)      |
| 85       | 65       | 151      | Tb      | —71 098 (11)      |
| 84       | 66       |          | Dy      | —69 140 (c)       |
| 83       | 67       |          | Ho      | —62 040 (c)       |
| 82       | 68       |          | Er      | —57 940 (c)       |
| 92       | 59       |          | Pr      | —67 440 (c)       |
| 91       | 60       |          | Nd      | —70 945 (6)       |
| 90       | 61       |          | Pm      | —73 386 (11)      |
| 89       | 62       |          | Sm      | —74 574 (5)       |
| 88       | 63       |          | Eu      | —74 650 (5)       |
| 87       | 64       |          | Gd      | —74 168 (9)       |
| 86       | 65       | 152      | Tb      | —71 608 (8)       |
| 85       | 66       |          | Dy      | —68 601 (27)      |
| 84       | 67       |          | Ho      | —63 440 (c)       |
| 83       | 68       |          | Er      | —58 200 (c)       |
| 82       | 69       |          | Tm      | —50 800 (c)       |
| 92       | 60       |          | Nd      | —70 146 (31)      |
| 91       | 61       |          | Pm      | —71 290 (130)     |
| 90       | 62       |          | Sm      | —74 761 (5)       |
| 89       | 63       |          | Eu      | —72 884 (5)       |
| 88       | 64       |          | Gd      | —74 703 (6)       |
| 87       | 65       | 153      | Tb      | —70 853 (16)      |
| 86       | 66       |          | Dy      | —70 116 (8)       |
| 85       | 67       |          | Ho      | —63 710 (80)      |
| 84       | 68       |          | Er      | —60 410 (c)       |
| 83       | 69       |          | Tm      | —51 810 (c)       |
| 93       | 60       |          | Nd      | —67 360 (c)       |
| 92       | 61       |          | Pm      | —70 760 (100)     |
| 91       | 62       |          | Sm      | —72 557 (5)       |
| 90       | 63       |          | Eu      | —73 363 (6)       |
| 89       | 64       |          | Gd      | —73 119 (6)       |
| 88       | 65       | 154      | Tb      | —71 329 (9)       |
| 87       | 66       |          | Dy      | —69 155 (8)       |
| 86       | 67       |          | Ho      | —64 954 (34)      |
| 85       | 68       |          | Er      | —60 310 (c)       |
| 84       | 69       |          | Tm      | —53 870 (c)       |
| 83       | 70       |          | Yb      | —47 210 (c)       |
| 93       | 61       |          | Pm      | —68 450 (100)     |
| 92       | 62       |          | Sm      | —72 454 (5)       |
| 91       | 63       |          | Eu      | —71 726 (7)       |
| 90       | 64       |          | Gd      | —73 704 (5)       |
| 89       | 65       | 155      | Tb      | —70 240 (50)      |
| 88       | 66       |          | Dy      | —70 392 (12)      |
| 87       | 67       |          | Ho      | —64 635 (c)       |
| 86       | 68       |          | Er      | —62 440 (c)       |
| 85       | 69       |          | Tm      | —54 530 (c)       |
| 84       | 70       |          | Yb      | —50 050 (c)       |
| 94       | 61       |          | Pm      | —67 100 (c)       |
| 93       | 62       |          | Sm      | —70 196 (5)       |
| 92       | 63       |          | Eu      | —71 825 (6)       |
| 91       | 64       |          | Gd      | —72 071 (5)       |
| 90       | 65       |          | Tb      | —71 256 (15)      |

| N  | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|----|----|-----|---------|-------------------|
| 89 | 66 | 156 | Dy      | -69 157 (13)      |
| 88 | 67 |     | Ho      | -66 055 (24)      |
| 87 | 68 |     | Er      | -62 057 (27)      |
| 86 | 69 |     | Tm      | -56 450 (c)       |
| 85 | 70 |     | Yb      | -50 450 (c)       |
| 84 | 71 |     | Lu      | -42 600 (c)       |
| 94 | 62 |     | Sm      | -69 368 (14)      |
| 93 | 63 |     | Eu      | -70 083 (11)      |
| 92 | 64 |     | Gd      | -72 536 (5)       |
| 91 | 65 |     | Tb      | -70 098 (7)       |
| 90 | 66 | 157 | Dy      | -70 527 (9)       |
| 89 | 67 |     | Ho      | -65 410 (c)       |
| 88 | 68 |     | Er      | -63 930 (c)       |
| 87 | 69 |     | Tm      | -56 940 (80)      |
| 86 | 70 |     | Yb      | -53 060 (c)       |
| 85 | 71 |     | Lu      | -43 810 (c)       |
| 95 | 62 |     | Sm      | -66 860 (200)     |
| 94 | 63 |     | Eu      | -69 465 (16)      |
| 93 | 64 |     | Gd      | -70 825 (5)       |
| 92 | 65 |     | Tb      | -70 767 (6)       |
| 91 | 66 | 158 | Dy      | -69 425 (9)       |
| 90 | 67 |     | Ho      | -66 890 (50)      |
| 89 | 68 |     | Er      | -63 090 (c)       |
| 88 | 69 |     | Tm      | -58 490 (c)       |
| 87 | 70 |     | Yb      | -53 270 (c)       |
| 86 | 71 |     | Lu      | -46 470 (c)       |
| 85 | 72 |     | Hf      | -38 960 (c)       |
| 95 | 63 |     | Eu      | -67 240 (80)      |
| 94 | 64 |     | Gd      | -70 691 (5)       |
| 93 | 65 |     | Tb      | -69 475 (6)       |
| 92 | 66 | 159 | Dy      | -70 410 (6)       |
| 91 | 67 |     | Ho      | -66 433 (8)       |
| 90 | 68 |     | Er      | -65 030 (c)       |
| 89 | 69 |     | Tm      | -58 430 (c)       |
| 88 | 70 |     | Yb      | -55 530 (c)       |
| 87 | 71 |     | Lu      | -47 230 (c)       |
| 86 | 72 |     | Hf      | -42 220 (c)       |
| 96 | 63 |     | Eu      | -65 930 (50)      |
| 95 | 64 |     | Gd      | -68 562 (6)       |
| 94 | 65 |     | Tb      | -69 536 (6)       |
| 93 | 66 | 160 | Dy      | -69 171 (6)       |
| 92 | 67 |     | Ho      | -67 318 (11)      |
| 91 | 68 |     | Er      | -64 390 (100)     |
| 90 | 69 |     | Tm      | -60 190 (c)       |
| 89 | 70 |     | Yb      | -55 290 (c)       |
| 88 | 71 |     | Lu      | -49 490 (c)       |
| 87 | 72 |     | Hf      | -42 800 (c)       |
| 97 | 63 |     | Eu      | -63 540 (c)       |
| 96 | 64 |     | Gd      | -67 943 (5)       |
| 95 | 65 |     | Tb      | -67 840 (6)       |
| 94 | 66 | 161 | Dy      | -69 774 (6)       |
| 93 | 67 |     | Ho      | -66 388 (16)      |
| 92 | 68 |     | Er      | -66 052 (29)      |
| 91 | 69 |     | Tm      | -60 130 (60)      |
| 90 | 70 |     | Yb      | -57 550 (c)       |
| 89 | 71 |     | Lu      | -49 930 (c)       |
| 88 | 72 |     | Hf      | -45 750 (c)       |
| 87 | 73 |     | Ta      | -35 780 (c)       |
| 97 | 64 |     | Gd      | -65 507 (6)       |
| 96 | 65 |     | Tb      | -67 466 (6)       |
| 95 | 66 |     | Dy      | -68 056 (6)       |

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 94  | 67 | 162 | Ho      | -67 203 (6)       |
| 93  | 68 |     | Er      | -65 197 (12)      |
| 92  | 69 |     | Tm      | -61 680 (c)       |
| 91  | 70 |     | Yb      | -57 400 (c)       |
| 90  | 71 |     | Lu      | -52 080 (c)       |
| 89  | 72 |     | Hf      | -46 130 (c)       |
| 88  | 73 |     | Ta      | -38 840 (c)       |
| 98  | 64 |     | Cd      | -64 360 (120)     |
| 97  | 65 |     | Tb      | -65 760 (70)      |
| 96  | 66 |     | Dy      | -68 181 (6)       |
| 95  | 67 | 163 | Ho      | -66 047 (7)       |
| 94  | 68 |     | Er      | -66 335 (6)       |
| 93  | 69 |     | Tm      | -61 540 (60)      |
| 92  | 70 |     | Yb      | -59 340 (c)       |
| 91  | 71 |     | Lu      | -52 340 (c)       |
| 90  | 72 |     | Hf      | -48 760 (c)       |
| 89  | 73 |     | Ta      | -39 710 (c)       |
| 88  | 74 |     | W       | -34 130 (c)       |
| 98  | 65 |     | Tb      | -64 680 (50)      |
| 97  | 66 | 164 | Dy      | -66 382 (6)       |
| 96  | 67 |     | Ho      | -66 379 (6)       |
| 95  | 68 |     | Er      | -65 168 (7)       |
| 94  | 69 |     | Tm      | -62 770 (c)       |
| 93  | 70 |     | Yb      | -59 170 (c)       |
| 92  | 71 |     | Lu      | -54 370 (c)       |
| 91  | 72 |     | Hf      | -48 770 (c)       |
| 90  | 73 |     | Ta      | -42 370 (c)       |
| 89  | 74 |     | W       | -34 850 (c)       |
| 99  | 65 |     | Tb      | -62 110 (150)     |
| 98  | 66 | 165 | Dy      | -65 967 (6)       |
| 97  | 67 |     | Ho      | -64 937 (6)       |
| 96  | 68 |     | Er      | -65 940 (6)       |
| 95  | 69 |     | Tm      | -61 978 (21)      |
| 94  | 70 |     | Yb      | -60 880 (c)       |
| 93  | 71 |     | Lu      | -54 580 (c)       |
| 92  | 72 |     | Hf      | -51 280 (c)       |
| 91  | 73 |     | Ta      | -43 080 (c)       |
| 90  | 74 |     | W       | -38 040 (c)       |
| 99  | 66 |     | Dy      | -63 611 (6)       |
| 98  | 67 | 166 | Ho      | -64 896 (6)       |
| 97  | 68 |     | Er      | -64 518 (6)       |
| 96  | 69 |     | Tm      | -62 924 (6)       |
| 95  | 70 |     | Yb      | -60 161 (21)      |
| 94  | 71 |     | Lu      | -56 160 (c)       |
| 93  | 72 |     | Hf      | -51 260 (c)       |
| 92  | 73 |     | Ta      | -45 360 (c)       |
| 91  | 74 |     | W       | -38 670 (c)       |
| 100 | 66 |     | Dy      | -62 583 (8)       |
| 99  | 67 | 167 | Ho      | -63 067 (6)       |
| 98  | 68 |     | Er      | -64 921 (6)       |
| 97  | 69 |     | Tm      | -61 874 (13)      |
| 96  | 70 |     | Yb      | -61 582 (9)       |
| 95  | 71 |     | Lu      | -56 100 (160)     |
| 94  | 72 |     | Hf      | -53 480 (c)       |
| 93  | 73 |     | Ta      | -46 100 (c)       |
| 92  | 74 |     | W       | -41 480 (c)       |
| 100 | 67 |     | Ho      | -62 316 (21)      |
| 99  | 68 |     | Er      | -63 286 (6)       |
| 98  | 69 | 167 | Tm      | -62 537 (6)       |
| 97  | 70 |     | Yb      | -60 583 (7)       |
| 96  | 71 |     | Lu      | -57 450 (70)      |

Продолжение табл. 39.1

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 95  | 72 | 168 | Hf      | -53 150 (c)       |
| 94  | 73 |     | Ta      | -47 950 (c)       |
| 93  | 74 |     | W       | -41 950 (c)       |
| 92  | 75 |     | Re      | -34 650 (c)       |
| 101 | 67 |     | Ho      | -60 270 (100)     |
| 100 | 68 |     | Er      | -62 985 (6)       |
| 99  | 69 |     | Tm      | -61 306 (6)       |
| 98  | 70 |     | Yb      | -61 565 (7)       |
| 97  | 71 |     | Lu      | -57 100 (80)      |
| 96  | 72 |     | Hf      | -55 100 (c)       |
| 95  | 73 | 169 | Ta      | -48 400 (c)       |
| 94  | 74 |     | W       | -44 500 (c)       |
| 93  | 75 |     | Re      | -35 700 (c)       |
| 102 | 67 |     | Ho      | -58 793 (21)      |
| 101 | 68 |     | Er      | -60 917 (6)       |
| 100 | 69 |     | Tm      | -61 269 (6)       |
| 99  | 70 |     | Yb      | -60 361 (7)       |
| 98  | 71 |     | Lu      | -57 881 (26)      |
| 97  | 72 |     | Hf      | -54 530 (100)     |
| 96  | 73 |     | Ta      | -50 030 (c)       |
| 95  | 74 | 170 | W       | -44 890 (c)       |
| 94  | 75 |     | Re      | -38 130 (c)       |
| 93  | 76 |     | Os      | -30 550 (c)       |
| 103 | 67 |     | Ho      | -56 100 (200)     |
| 102 | 68 |     | Er      | -60 104 (6)       |
| 101 | 69 |     | Tm      | -59 791 (6)       |
| 100 | 70 |     | Yb      | -60 759 (6)       |
| 99  | 71 |     | Lu      | -57 319 (21)      |
| 98  | 72 |     | Hf      | -56 120 (c)       |
| 97  | 73 |     | Ta      | -50 120 (c)       |
| 96  | 74 | 171 | W       | -46 920 (c)       |
| 95  | 75 |     | Re      | -38 920 (c)       |
| 94  | 76 |     | Os      | -33 530 (c)       |
| 103 | 68 |     | Er      | -57 714 (6)       |
| 102 | 69 |     | Tm      | -59 205 (6)       |
| 101 | 70 |     | Yb      | -59 302 (6)       |
| 100 | 71 |     | Lu      | -57 821 (6)       |
| 99  | 72 |     | Hf      | -55 300 (c)       |
| 98  | 73 |     | Ta      | -51 600 (c)       |
| 97  | 74 |     | W       | -46 900 (c)       |
| 96  | 75 | 172 | Re      | -41 100 (c)       |
| 95  | 76 |     | Os      | -34 160 (c)       |
| 94  | 77 |     | Ir      | -26 180 (c)       |
| 104 | 68 |     | Er      | -56 491 (13)      |
| 103 | 69 |     | Tm      | -57 380 (11)      |
| 102 | 70 |     | Yb      | -59 250 (6)       |
| 101 | 71 |     | Lu      | -56 726 (6)       |
| 100 | 72 |     | Hf      | -56 330 (c)       |
| 99  | 73 |     | Ta      | -51 410 (c)       |
| 98  | 74 |     | W       | -48 810 (c)       |
| 97  | 75 | 173 | Re      | -41 510 (c)       |
| 96  | 76 |     | Os      | -36 840 (c)       |
| 95  | 77 |     | Ir      | -27 320 (c)       |
| 105 | 68 |     | Er      | -53 730 (200)     |
| 104 | 69 |     | Tm      | -56 226 (31)      |
| 103 | 70 |     | Yb      | -57 546 (6)       |
| 102 | 71 |     | Lu      | -56 871 (6)       |
| 101 | 72 |     | Hf      | -55 270 (c)       |
| 100 | 73 |     | Ta      | -52 370 (c)       |
| 99  | 74 |     | W       | -48 470 (c)       |
| 98  | 75 |     | Re      | -43 370 (c)       |

Продолжение табл. 39.1

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 97  | 76 | 174 | Os      | -37 410 (c)       |
| 96  | 77 |     | Ir      | -29 910 (c)       |
| 95  | 78 |     | Pt      | -21 790 (c)       |
| 105 | 69 |     | Tm      | -53 850 (50)      |
| 104 | 70 |     | Yb      | -56 940 (6)       |
| 103 | 71 |     | Lu      | -55 562 (6)       |
| 102 | 72 |     | Hf      | -55 830 (8)       |
| 101 | 73 |     | Ta      | -51 980 (80)      |
| 100 | 74 |     | W       | -50 080 (c)       |
| 99  | 75 |     | Re      | -43 580 (c)       |
| 98  | 76 | 175 | Os      | -39 620 (c)       |
| 97  | 77 |     | Ir      | -30 890 (c)       |
| 96  | 78 |     | Pt      | -24 930 (c)       |
| 106 | 69 |     | Tm      | -52 290 (50)      |
| 105 | 70 |     | Yb      | -54 691 (6)       |
| 104 | 71 |     | Lu      | -55 159 (5)       |
| 103 | 72 |     | Hf      | -54 548 (10)      |
| 102 | 73 |     | Ta      | -52 350 (c)       |
| 101 | 74 |     | W       | -49 450 (c)       |
| 100 | 75 |     | Re      | -45 150 (c)       |
| 99  | 76 | 176 | Os      | -39 710 (c)       |
| 98  | 77 |     | Ir      | -33 160 (c)       |
| 97  | 78 |     | Pt      | -25 640 (c)       |
| 96  | 79 |     | Au      | -17 160 (c)       |
| 107 | 69 |     | Tm      | -49 590 (c)       |
| 106 | 70 |     | Yb      | -53 490 (6)       |
| 105 | 71 |     | Lu      | -53 381 (5)       |
| 104 | 72 |     | Hf      | -54 567 (6)       |
| 103 | 73 |     | Ta      | -51 470 (100)     |
| 102 | 74 |     | W       | -50 570 (c)       |
| 101 | 75 | 177 | Re      | -44 970 (c)       |
| 100 | 76 |     | Os      | -41 810 (c)       |
| 99  | 77 |     | Ir      | -33 840 (c)       |
| 98  | 78 |     | Pt      | -28 540 (c)       |
| 97  | 79 |     | Au      | -18 400 (c)       |
| 107 | 70 |     | Yb      | -50 986 (6)       |
| 106 | 71 |     | Lu      | -52 382 (5)       |
| 105 | 72 |     | Hf      | -52 879 (6)       |
| 104 | 73 |     | Ta      | -51 721 (7)       |
| 103 | 74 |     | W       | -49 720 (c)       |
| 102 | 75 | 178 | Re      | -46 120 (c)       |
| 101 | 76 |     | Os      | -41 620 (c)       |
| 100 | 77 |     | Ir      | -35 820 (c)       |
| 99  | 78 |     | Pt      | -29 350 (c)       |
| 98  | 79 |     | Au      | -21 190 (c)       |
| 97  | 80 |     | Hg      | -12 650 (c)       |
| 108 | 70 |     | Yb      | -49 660 (50)      |
| 107 | 71 |     | Lu      | -50 300 (40)      |
| 106 | 72 |     | Hf      | -52 434 (6)       |
| 105 | 73 |     | Ta      | -50 520 (100)     |
| 104 | 74 | 179 | W       | -50 430 (100)     |
| 103 | 75 |     | Re      | -45 770 (210)     |
| 102 | 76 |     | Os      | -43 350 (c)       |
| 101 | 77 |     | Ir      | -36 270 (c)       |
| 100 | 78 |     | Pt      | -31 630 (c)       |
| 99  | 79 |     | Au      | -22 410 (c)       |
| 98  | 80 |     | Hg      | -15 930 (c)       |
| 108 | 71 |     | Lu      | -49 110 (40)      |
| 107 | 72 |     | Hf      | -50 462 (6)       |
| 106 | 73 |     | Ta      | -50 347 (8)       |
| 105 | 74 |     | W       | -49 283 (17)      |
| 104 | 75 |     | Re      | -46 590 (50)      |

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 103 | 76 | 180 | Os      | —42 890 (c)       |
| 102 | 77 |     | Ir      | —37 890 (c)       |
| 101 | 78 |     | Pt      | —32 010 (c)       |
| 100 | 79 |     | Au      | —24 750 (c)       |
| 99  | 80 |     | Hg      | —16 800 (c)       |
| 109 | 71 |     | Lu      | —46 680 (70)      |
| 108 | 72 |     | Hf      | —49 779 (6)       |
| 107 | 73 |     | Ta      | —48 914 (13)      |
| 106 | 74 |     | W       | —49 624 (8)       |
| 105 | 75 |     | Re      | —45 829 (31)      |
| 104 | 76 | 181 | Os      | —44 220 (c)       |
| 103 | 77 |     | Ir      | —37 930 (c)       |
| 102 | 78 |     | Pt      | —34 120 (c)       |
| 101 | 79 |     | Au      | —25 630 (c)       |
| 100 | 80 |     | Hg      | —19 860 (c)       |
| 109 | 72 |     | Hf      | —47 403 (6)       |
| 108 | 73 |     | Ta      | —48 425 (6)       |
| 107 | 74 |     | W       | —48 237 (9)       |
| 106 | 75 |     | Re      | —46 440 (c)       |
| 105 | 76 |     | Os      | —43 410 (c)       |
| 104 | 77 | 182 | Ir      | —39 340 (c)       |
| 103 | 78 |     | Pt      | —34 060 (c)       |
| 102 | 79 |     | Au      | —27 640 (c)       |
| 101 | 80 |     | Hg      | —20 790 (c)       |
| 110 | 72 |     | Hf      | —45 990 (50)      |
| 109 | 73 |     | Ta      | —46 417 (6)       |
| 108 | 74 |     | W       | —48 228 (6)       |
| 107 | 75 |     | Re      | —45 430 (c)       |
| 106 | 76 |     | Os      | —44 580 (c)       |
| 105 | 77 |     | Ir      | —38 980 (c)       |
| 104 | 78 | 183 | Pt      | —35 980 (c)       |
| 103 | 79 |     | Au      | —28 180 (c)       |
| 102 | 80 |     | Hg      | —23 210 (c)       |
| 111 | 72 |     | Hf      | —43 269 (32)      |
| 110 | 73 |     | Ta      | —45 279 (12)      |
| 109 | 74 |     | W       | —46 347 (6)       |
| 108 | 75 |     | Re      | —45 791 (10)      |
| 107 | 76 |     | Os      | —43 490 (c)       |
| 106 | 77 |     | Ir      | —40 090 (c)       |
| 105 | 78 |     | Pt      | —35 630 (c)       |
| 104 | 79 | 184 | Au      | —30 010 (c)       |
| 103 | 80 |     | Hg      | —23 690 (c)       |
| 102 | 81 |     | Tl      | —15 830 (c)       |
| 112 | 72 |     | Hf      | —41 480 (60)      |
| 111 | 73 |     | Ta      | —42 821 (27)      |
| 110 | 74 |     | W       | —45 687 (7)       |
| 109 | 75 |     | Re      | —44 191 (9)       |
| 108 | 76 |     | Os      | —44 233 (7)       |
| 107 | 77 |     | Ir      | —39 510 (250)     |
| 106 | 78 |     | Pt      | —37 210 (c)       |
| 105 | 79 | 185 | Au      | —30 220 (c)       |
| 104 | 80 |     | Hg      | —26 040 (c)       |
| 103 | 81 |     | Tl      | —16 900 (c)       |
| 112 | 73 |     | Ta      | —41 360 (21)      |
| 111 | 74 |     | W       | —43 370 (7)       |
| 110 | 75 |     | Re      | —43 802 (7)       |
| 109 | 76 |     | Os      | —42 787 (7)       |
| 108 | 77 |     | Ir      | —40 290 (c)       |
| 107 | 78 |     | Pt      | —36 490 (c)       |
| 106 | 79 |     | Au      | —31 730 (c)       |

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 105 | 80 | 186 | Hg      | —26 140 (c)       |
| 104 | 81 |     | Tl      | —19 110 (c)       |
| 103 | 82 |     | Pb      | —11 740 (c)       |
| 113 | 73 |     | Ta      | —38 600 (60)      |
| 112 | 74 |     | W       | —42 498 (7)       |
| 111 | 75 |     | Re      | —41 910 (7)       |
| 110 | 76 |     | Os      | —42 987 (7)       |
| 109 | 77 |     | Ir      | —39 156 (21)      |
| 108 | 78 |     | Pt      | —37 830 (c)       |
| 107 | 79 |     | Au      | —31 690 (c)       |
| 106 | 80 | 187 | Hg      | —28 350 (c)       |
| 105 | 81 |     | Tl      | —19 860 (c)       |
| 104 | 82 |     | Pb      | —14 330 (c)       |
| 113 | 74 |     | W       | —39 893 (7)       |
| 112 | 75 |     | Re      | —41 205 (7)       |
| 111 | 76 |     | Os      | —41 208 (7)       |
| 110 | 77 |     | Ir      | —39 710 (c)       |
| 109 | 78 |     | Pt      | —36 810 (c)       |
| 108 | 79 |     | Au      | —32 870 (c)       |
| 107 | 80 | 188 | Hg      | —28 060 (c)       |
| 106 | 81 |     | Tl      | —21 930 (c)       |
| 105 | 82 |     | Pb      | —14 940 (c)       |
| 114 | 74 |     | W       | —38 657 (7)       |
| 113 | 75 |     | Re      | —39 006 (7)       |
| 112 | 76 |     | Os      | —41 125 (7)       |
| 111 | 77 |     | Ir      | —38 323 (13)      |
| 110 | 78 |     | Pt      | —37 788 (11)      |
| 109 | 79 |     | Au      | —32 490 (c)       |
| 108 | 80 | 189 | Hg      | —29 880 (c)       |
| 107 | 81 |     | Tl      | —22 290 (c)       |
| 106 | 82 |     | Pb      | —17 500 (c)       |
| 115 | 74 |     | W       | —35 470 (200)     |
| 114 | 75 |     | Re      | —37 970 (11)      |
| 113 | 76 |     | Os      | —38 978 (7)       |
| 112 | 77 |     | Ir      | —38 480 (c)       |
| 111 | 78 |     | Pt      | —36 570 (c)       |
| 110 | 79 |     | Au      | —33 410 (c)       |
| 109 | 80 | 190 | Hg      | —29 210 (c)       |
| 108 | 81 |     | Tl      | —24 020 (c)       |
| 107 | 82 |     | Pb      | —17 860 (c)       |
| 106 | 83 |     | Bi      | —9870 (c)         |
| 116 | 74 |     | W       | —34 220 (360)     |
| 115 | 75 |     | Re      | —35 520 (200)     |
| 114 | 76 |     | Os      | —38 699 (7)       |
| 113 | 77 |     | Ir      | —36 700 (200)     |
| 112 | 78 |     | Pt      | —37 318 (21)      |
| 111 | 79 |     | Au      | —32 876 (26)      |
| 110 | 80 | 191 | Hg      | —30 960 (80)      |
| 109 | 81 |     | Tl      | —24 160 (310)     |
| 108 | 82 |     | Pb      | —20 220 (c)       |
| 107 | 83 |     | Bi      | —10 850 (c)       |
| 116 | 75 |     | Re      | —34 343 (12)      |
| 115 | 76 |     | Os      | —36 388 (7)       |
| 114 | 77 |     | Ir      | —36 698 (7)       |
| 113 | 78 |     | Pt      | —35 698 (16)      |
| 112 | 79 |     | Au      | —33 870 (50)      |
| 111 | 80 |     | Hg      | —30 480 (70)      |
| 110 | 81 |     | Tl      | —25 670 (210)     |
| 109 | 82 |     | Pb      | —20 230 (c)       |
| 108 | 83 |     | Bi      | —13 050 (c)       |



| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 116 | 76 | 192 | Os      | —35 875 (7)       |
| 115 | 77 |     | Ir      | —34 826 (7)       |
| 114 | 78 |     | Pt      | —36 283 (7)       |
| 113 | 79 |     | Au      | —32 768 (17)      |
| 112 | 80 |     | Hg      | —31 970 (c)       |
| 111 | 81 |     | Tl      | —25 590 (c)       |
| 110 | 82 |     | Pb      | —22 290 (c)       |
| 109 | 83 |     | Bi      | —13 670 (c)       |
| 117 | 76 | 193 | Os      | —33 387 (8)       |
| 116 | 77 |     | Ir      | —34 519 (6)       |
| 115 | 78 |     | Pt      | —34 458 (7)       |
| 114 | 79 |     | Au      | —33 360 (c)       |
| 113 | 80 |     | Hg      | —31 020 (c)       |
| 112 | 81 |     | Tl      | —27 020 (c)       |
| 111 | 82 |     | Pb      | —22 070 (c)       |
| 110 | 83 |     | Bi      | —15 560 (c)       |
| 109 | 84 |     | Po      | — 8 310 (c)       |
| 118 | 76 | 194 | Os      | —32 417 (7)       |
| 117 | 77 |     | Ir      | —32 514 (6)       |
| 116 | 78 |     | Pt      | —34 765 (6)       |
| 115 | 79 |     | Au      | —32 256 (16)      |
| 114 | 80 |     | Hg      | —32 206 (26)      |
| 113 | 81 |     | Tl      | —26 810 (c)       |
| 112 | 82 |     | Pb      | —23 810 (c)       |
| 111 | 83 |     | Bi      | —15 980 (c)       |
| 110 | 84 |     | Po      | —10 810 (c)       |
| 119 | 76 | 195 | Os      | —29 690 (500)     |
| 118 | 77 |     | Ir      | —31 692 (31)      |
| 117 | 78 |     | Pt      | —32 802 (6)       |
| 116 | 79 |     | Au      | —32 572 (6)       |
| 115 | 80 |     | Hg      | —31 050 (50)      |
| 114 | 81 |     | Tl      | —27 850 (210)     |
| 113 | 82 |     | Pb      | —23 550 (c)       |
| 112 | 83 |     | Bi      | —17 680 (210)     |
| 111 | 84 |     | Po      | —11 060 (c)       |
| 119 | 77 | 196 | Ir      | —29 440 (60)      |
| 118 | 78 |     | Pt      | —32 652 (6)       |
| 117 | 79 |     | Au      | —31 162 (9)       |
| 116 | 80 |     | Hg      | —31 846 (10)      |
| 115 | 81 |     | Tl      | —27 350 (c)       |
| 114 | 82 |     | Pb      | —25 150 (c)       |
| 113 | 83 |     | Bi      | —17 760 (c)       |
| 112 | 84 |     | Po      | —13 210 (c)       |
| 111 | 85 |     | At      | —4050 (c)         |
| 120 | 77 | 197 | Ir      | —28 430 (200)     |
| 119 | 78 |     | Pt      | —30 431 (6)       |
| 118 | 79 |     | Au      | —31 150 (6)       |
| 117 | 80 |     | Hg      | —30 735 (21)      |
| 116 | 81 |     | Tl      | —28 330 (c)       |
| 115 | 82 |     | Pb      | —24 630 (c)       |
| 114 | 83 |     | Bi      | —19 410 (c)       |
| 113 | 84 |     | Po      | —13 230 (c)       |
| 112 | 85 |     | At      | —6030 (c)         |
| 121 | 77 | 198 | Ir      | —25 520 (300)     |
| 120 | 78 |     | Pt      | —29 921 (20)      |
| 119 | 79 |     | Au      | —29 591 (6)       |
| 118 | 80 |     | Hg      | —30 964 (6)       |
| 117 | 81 |     | Tl      | —27 500 (80)      |
| 116 | 82 |     | Pb      | —25 900 (c)       |
| 115 | 83 |     | Bi      | —19 300 (c)       |
| 114 | 84 |     | Po      | —15 070 (c)       |
| 113 | 85 |     | At      | —6670 (310)       |

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 121 | 78 | 199 | Pt      | —27 420 (25)      |
| 120 | 79 |     | Au      | —29 104 (6)       |
| 119 | 80 |     | Hg      | —29 557 (6)       |
| 118 | 81 |     | Tl      | —28 080 (220)     |
| 117 | 82 |     | Pb      | —25 280 (90)      |
| 116 | 83 |     | Bi      | —20 610 (c)       |
| 115 | 84 |     | Po      | —15 050 (c)       |
| 114 | 85 |     | At      | —8470 (210)       |
| 122 | 78 | 200 | Pt      | —26 600 (c)       |
| 121 | 79 |     | Au      | —27 300 (50)      |
| 120 | 80 |     | Hg      | —29 514 (6)       |
| 119 | 81 |     | Tl      | —27 060 (10)      |
| 118 | 82 |     | Pb      | —26 160 (c)       |
| 117 | 83 |     | Bi      | —20 460 (c)       |
| 116 | 84 |     | Po      | —16 740 (c)       |
| 115 | 85 |     | At      | —8670 (c)         |
| 114 | 86 |     | Rn      | —3740 (c)         |
| 123 | 78 | 201 | Pt      | —23 740 (110)     |
| 122 | 79 |     | Au      | —26 400 (100)     |
| 121 | 80 |     | Hg      | —27 672 (6)       |
| 120 | 81 |     | Tl      | —27 185 (16)      |
| 119 | 82 |     | Pb      | —25 327 (35)      |
| 118 | 83 |     | Bi      | —21 410 (c)       |
| 117 | 84 |     | Po      | —16 410 (c)       |
| 116 | 85 |     | At      | —10 520 (c)       |
| 115 | 86 |     | Rn      | —3950 (c)         |
| 123 | 79 | 202 | Au      | —23 860 (200)     |
| 122 | 80 |     | Hg      | —27 356 (6)       |
| 121 | 81 |     | Tl      | —25 988 (18)      |
| 120 | 82 |     | Pb      | —25 942 (11)      |
| 119 | 83 |     | Bi      | —21 040 (c)       |
| 118 | 84 |     | Po      | —17 780 (c)       |
| 117 | 85 |     | At      | —10 520 (c)       |
| 116 | 86 |     | Rn      | —5880 (c)         |
| 115 | 87 |     | Fr      | —3160 (310)       |
| 124 | 79 | 203 | Au      | —22 980 (c)       |
| 123 | 80 |     | Hg      | —25 277 (6)       |
| 122 | 81 |     | Tl      | —25 769 (6)       |
| 121 | 82 |     | Pb      | —24 794 (10)      |
| 120 | 83 |     | Bi      | —21 600 (50)      |
| 119 | 84 |     | Po      | —17 360 (90)      |
| 118 | 85 |     | At      | —11 970 (c)       |
| 117 | 86 |     | Rn      | —6000 (c)         |
| 116 | 87 |     | Fr      | —1230 (210)       |
| 125 | 79 | 204 | Au      | —20 200 (300)     |
| 124 | 80 |     | Hg      | —24 703 (6)       |
| 123 | 81 |     | Tl      | —24 353 (6)       |
| 122 | 82 |     | Pb      | —25 117 (6)       |
| 121 | 83 |     | Bi      | —20 820 (c)       |
| 120 | 84 |     | Po      | —18 250 (c)       |
| 119 | 85 |     | At      | —11 970 (c)       |
| 118 | 86 |     | Rn      | —7770 (c)         |
| 117 | 87 |     | Fr      | 870 (c)           |
| 116 | 88 |     | Ra      | 6280 (c)          |
| 125 | 80 | 205 | Hg      | —22 299 (8)       |
| 124 | 81 |     | Tl      | —23 837 (5)       |
| 123 | 82 |     | Pb      | —23 777 (6)       |
| 122 | 83 |     | Bi      | —21 070 (9)       |
| 121 | 84 |     | Po      | —17 576 (35)      |
| 120 | 85 |     | At      | —12 960 (c)       |

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ | N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 119 | 86 | 206 | Rn      | —7600 (c)         | 131 | 82 | 213 | Pb      | —3140 (c)         |
| 118 | 87 |     | Fr      | —1040 (c)         | 130 | 83 |     | Bi      | —5243 (11)        |
| 117 | 88 |     | Ra      | 5980 (c)          | 129 | 84 |     | Po      | —6663 (7)         |
| 126 | 80 |     | Hg      | —20 955 (21)      | 128 | 85 |     | At      | —6589 (13)        |
| 125 | 81 |     | Tl      | —22 269 (5)       | 127 | 86 |     | Rn      | —5706 (11)        |
| 124 | 82 |     | Pb      | —23 795 (5)       | 126 | 87 |     | Fr      | —3556 (11)        |
| 123 | 83 |     | Bi      | —20 033 (12)      | 125 | 88 |     | Ra      | 290 (35)          |
| 122 | 84 |     | Po      | —18 190 (11)      | 124 | 89 |     | Ac      | 6170 (c)          |
| 121 | 85 |     | At      | —12 730 (c)       | 123 | 90 |     | Th      | 12 240 (c)        |
| 120 | 86 |     | Rn      | —8970 (c)         | 132 | 82 | 214 | Pb      | —185,3 (33)       |
| 119 | 87 | 207 | Fr      | —1180 (c)         | 131 | 83 |     | Bi      | —1209 (12)        |
| 118 | 88 |     | Ra      | 3960 (c)          | 130 | 84 |     | Po      | —4479 (5)         |
| 126 | 81 |     | Tl      | —21 041 (6)       | 129 | 85 |     | At      | —3389 (6)         |
| 125 | 82 |     | Pb      | —22 463 (5)       | 128 | 86 |     | Rn      | —4328 (11)        |
| 124 | 83 |     | Bi      | —20 058 (8)       | 127 | 87 |     | Fr      | —965 (13)         |
| 123 | 84 |     | Po      | —17 150 (11)      | 126 | 88 |     | Ra      | 90 (13)           |
| 122 | 85 |     | At      | —13 310 (50)      | 125 | 89 |     | Ac      | 6140 (c)          |
| 121 | 86 |     | Rn      | —8690 (90)        | 124 | 90 |     | Th      | 10 870 (c)        |
| 120 | 87 |     | Fr      | —2650 (c)         | 132 | 83 | 215 | Bi      | 1710 (100)        |
| 119 | 88 |     | Ra      | 3700 (c)          | 131 | 84 |     | Po      | —540,5 (37)       |
| 127 | 81 | 208 | Tl      | —16 768 (6)       | 130 | 85 |     | At      | —1262 (7)         |
| 126 | 82 |     | Pb      | —21 759 (5)       | 129 | 86 |     | Rn      | —1179 (10)        |
| 125 | 83 |     | Bi      | —18 879 (5)       | 128 | 87 |     | Fr      | 309 (13)          |
| 124 | 84 |     | Po      | —17 475 (6)       | 127 | 88 |     | Ra      | 2531 (12)         |
| 123 | 85 |     | At      | —12 640 (c)       | 126 | 89 |     | Ac      | 5950 (50)         |
| 122 | 86 |     | Rn      | —9560 (c)         | 125 | 90 |     | Th      | 10 870 (90)       |
| 121 | 87 |     | Fr      | —2770 (c)         | 133 | 83 | 216 | Bi      | 5970 (c)          |
| 120 | 88 |     | Ra      | 1930 (c)          | 132 | 84 |     | Po      | 1769 (6)          |
| 128 | 81 | 209 | Tl      | —13 650 (15)      | 131 | 85 |     | At      | 2237 (6)          |
| 127 | 82 |     | Pb      | —17 624 (5)       | 130 | 86 |     | Rn      | 245 (11)          |
| 126 | 83 |     | Bi      | —18 268 (5)       | 129 | 87 |     | Fr      | 2975 (14)         |
| 125 | 84 |     | Po      | —16 373 (7)       | 128 | 88 |     | Ra      | 3285 (11)         |
| 124 | 85 |     | At      | —12 888 (9)       | 127 | 89 |     | Ac      | 7980 (c)          |
| 123 | 86 |     | Rn      | —8994 (35)        | 126 | 90 |     | Th      | 10 390 (c)        |
| 122 | 87 |     | Fr      | —3760 (c)         | 133 | 84 | 217 | Po      | 5960 (c)          |
| 121 | 88 |     | Ra      | 1970 (c)          | 132 | 85 |     | At      | 4382 (12)         |
| 120 | 89 |     | Ac      | 9120 (c)          | 131 | 86 |     | Rn      | 3649 (8)          |
| 129 | 81 | 210 | Tl      | —9251 (13)        | 130 | 87 |     | Fr      | 4307 (15)         |
| 128 | 82 |     | Pb      | —14 738 (5)       | 129 | 88 |     | Ra      | 5881 (13)         |
| 127 | 83 |     | Bi      | —14 801 (5)       | 128 | 89 |     | Ac      | 8701 (15)         |
| 126 | 84 |     | Po      | —15 963 (5)       | 127 | 90 |     | Th      | 12 141 (36)       |
| 125 | 85 |     | At      | —11 976 (12)      | 134 | 84 | 218 | Po      | 8354,6 (33)       |
| 124 | 86 |     | Rn      | —9608 (12)        | 133 | 85 |     | At      | 8099 (13)         |
| 123 | 87 |     | Fr      | —3640 (c)         | 132 | 86 |     | Rn      | 5212 (5)          |
| 122 | 88 |     | Ra      | 610 (c)           | 131 | 87 |     | Fr      | 7050 (6)          |
| 121 | 89 |     | Ac      | 8860 (c)          | 130 | 88 |     | Ra      | 6644 (14)         |
| 129 | 82 | 211 | Pb      | —10 491,9 (38)    | 129 | 89 |     | Ac      | 10 837 (16)       |
| 128 | 83 |     | Bi      | —11 865 (6)       | 128 | 90 |     | Th      | 12 362 (16)       |
| 127 | 84 |     | Po      | —12 444 (5)       | 134 | 85 | 219 | At      | 10 530 (80)       |
| 126 | 85 |     | At      | —11 653 (9)       | 133 | 86 |     | Rn      | 8830,7 (37)       |
| 125 | 86 |     | Rn      | —8761 (11)        | 132 | 87 |     | Fr      | 8617 (9)          |
| 124 | 87 |     | Fr      | —4220 (50)        | 131 | 88 |     | Ra      | 9377 (14)         |
| 123 | 88 |     | Ra      | 780 (90)          | 130 | 89 |     | Ac      | 11 560 (16)       |
| 122 | 89 |     | Ac      | 7400 (c)          | 129 | 90 |     | Th      | 14 470 (24)       |
| 130 | 82 | 212 | Pb      | —7562 (6)         | 135 | 85 | 220 | At      | 14 200 (c)        |
| 129 | 83 |     | Bi      | —8135 (6)         | 134 | 86 |     | Rn      | 10 599 (6)        |
| 128 | 84 |     | Po      | —10 381 (5)       | 133 | 87 |     | Fr      | 11 470 (8)        |
| 127 | 85 |     | At      | —8625 (6)         | 132 | 88 |     | Ra      | 10 263 (15)       |
| 126 | 86 |     | Rn      | —8666 (7)         | 131 | 89 |     | Ac      | 13 747 (17)       |
| 125 | 87 |     | Fr      | —3690 (c)         | 130 | 90 |     | Th      | 14 663 (23)       |
| 124 | 88 |     | Ra      | —110 (c)          |     |    |     |         |                   |
| 123 | 89 |     | Ac      | 7180 (c)          |     |    |     |         |                   |

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 135 | 86 | 221 | Rn      | 14 380 (c)        |
| 134 | 87 |     | Fr      | 13 265 (12)       |
| 133 | 88 |     | Ra      | 12 957 (9)        |
| 132 | 89 |     | Ac      | 14 518 (18)       |
| 131 | 90 | 222 | Th      | 16 934 (14)       |
| 136 | 86 |     | Rn      | 16 370,0 (33)     |
| 135 | 87 |     | Fr      | 16 338 (21)       |
| 134 | 88 |     | Ra      | 14 312 (6)        |
| 133 | 89 |     | Ac      | 16 617 (7)        |
| 132 | 90 | 223 | Th      | 17 197 (16)       |
| 131 | 91 |     | Pa      | 21 959 (35)       |
| 136 | 87 |     | Fr      | 18 382,3 (37)     |
| 135 | 88 |     | Ra      | 17 234,8 (37)     |
| 134 | 89 | 224 | Ac      | 17 825 (9)        |
| 133 | 90 |     | Th      | 19 256 (17)       |
| 132 | 91 |     | Pa      | 22 330 (19)       |
| 137 | 87 |     | Fr      | 21 710 (c)        |
| 136 | 88 | 225 | Ra      | 18 813 (6)        |
| 135 | 89 |     | Ac      | 20 219 (8)        |
| 134 | 90 |     | Th      | 19 993 (18)       |
| 133 | 91 |     | Pa      | 23 798 (20)       |
| 138 | 87 | 226 | Fr      | 23 790 (c)        |
| 137 | 88 |     | Ra      | 21 987,3 (36)     |
| 136 | 89 |     | Ac      | 21 626 (12)       |
| 135 | 90 |     | Th      | 22 303 (11)       |
| 134 | 91 | 227 | Ra      | 24 320 (21)       |
| 139 | 87 |     | Fr      | 27 460 (330)      |
| 138 | 88 |     | Ra      | 28 665,7 (33)     |
| 137 | 89 |     | Ac      | 24 301,0 (38)     |
| 136 | 90 | 228 | Th      | 23 189 (6)        |
| 135 | 91 |     | Pa      | 26 029 (12)       |
| 134 | 92 |     | U       | 27 186 (34)       |
| 140 | 87 |     | Fr      | 29 580 (100)      |
| 139 | 88 | 229 | Ra      | 27 185 (20)       |
| 138 | 89 |     | Ac      | 25 850,0 (31)     |
| 137 | 90 |     | Th      | 25 806,3 (37)     |
| 136 | 91 |     | Pa      | 26 832 (10)       |
| 135 | 92 | 230 | U       | 28 880 (c)        |
| 140 | 88 |     | Ra      | 28 941 (5)        |
| 139 | 89 |     | Ac      | 28 895 (5)        |
| 138 | 90 |     | Th      | 26 758 (6)        |
| 137 | 91 | 231 | Pa      | 28 870 (9)        |
| 136 | 92 |     | U       | 29 221 (21)       |
| 141 | 88 |     | Ra      | 32 720 (c)        |
| 140 | 89 |     | Ac      | 30 720 (150)      |
| 139 | 90 | 232 | Th      | 29 580,9 (34)     |
| 138 | 91 |     | Pa      | 29 887 (13)       |
| 137 | 92 |     | U       | 31 201 (11)       |
| 136 | 93 |     | Np      | 33 758 (29)       |
| 142 | 88 | 233 | Ra      | 34 560 (c)        |
| 141 | 89 |     | Ac      | 33 760 (c)        |
| 140 | 90 |     | Th      | 30 861,3 (29)     |
| 139 | 91 |     | Pa      | 32 165,5 (37)     |
| 138 | 92 | 234 | U       | 31 607 (6)        |
| 137 | 93 |     | Np      | 35 232 (24)       |
| 142 | 89 |     | Ac      | 35 910 (100)      |
| 141 | 90 |     | Th      | 33 812,2 (30)     |
| 140 | 91 | 235 | Pa      | 33 423,1 (31)     |
| 139 | 92 |     | U       | 33 780 (50)       |
| 138 | 93 |     | Np      | 35 626 (13)       |

| N   | Z  | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|----|-----|---------|-------------------|
| 143 | 89 | 232 | Ac      | 39 150 (c)        |
| 142 | 90 |     | Th      | 35 447,2 (23)     |
| 141 | 91 |     | Pa      | 35 934 (12)       |
| 140 | 92 |     | U       | 34 597 (6)        |
| 139 | 93 | 233 | Np      | 37 290 (c)        |
| 138 | 94 |     | Pu      | 38 362 (23)       |
| 143 | 90 |     | Th      | 38 732,3 (24)     |
| 142 | 91 |     | Pa      | 37 487,1 (24)     |
| 141 | 92 | 234 | U       | 36 914,7 (33)     |
| 140 | 93 |     | Np      | 38 010 (c)        |
| 139 | 94 |     | Pu      | 40 042 (23)       |
| 144 | 90 |     | Th      | 40 612 (4)        |
| 143 | 91 | 235 | Pa      | 40 349 (5)        |
| 142 | 92 |     | U       | 38 142,6 (24)     |
| 141 | 93 |     | Np      | 39 951 (9)        |
| 140 | 94 |     | Pu      | 40 342 (8)        |
| 139 | 95 | 236 | Am      | 44 460 (c)        |
| 145 | 90 |     | Th      | 44 150 (c)        |
| 144 | 91 |     | Pa      | 42 320 (100)      |
| 143 | 92 |     | U       | 40 916,4 (24)     |
| 142 | 93 | 237 | Np      | 41 039,5 (26)     |
| 141 | 94 |     | Pu      | 42 160 (6)        |
| 140 | 95 |     | Am      | 44 650 (c)        |
| 145 | 91 |     | Pa      | 45 540 (200)      |
| 144 | 92 | 238 | U       | 42 442,0 (23)     |
| 143 | 93 |     | Np      | 43 426 (10)       |
| 142 | 94 |     | Pu      | 42 889 (6)        |
| 141 | 95 |     | Au      | 46 020 (c)        |
| 140 | 96 | 239 | Cm      | 47 890 (c)        |
| 146 | 91 |     | Pa      | 47 640 (50)       |
| 145 | 92 |     | U       | 45 388,7 (25)     |
| 144 | 93 |     | Np      | 44 869,3 (23)     |
| 143 | 94 | 240 | Pu      | 45 087 (6)        |
| 142 | 95 |     | Am      | 46 640 (c)        |
| 141 | 96 |     | Cm      | 49 170 (c)        |
| 147 | 91 |     | Pa      | 51 270 (300)      |
| 146 | 92 | 241 | U       | 48 307,0 (22)     |
| 145 | 93 |     | Np      | 47 452,6 (23)     |
| 144 | 94 |     | Pu      | 46 160,8 (24)     |
| 143 | 95 |     | Am      | 48 417 (32)       |
| 142 | 96 | 242 | Cm      | 49 398 (31)       |
| 141 | 97 |     | Bk      | 54 280 (c)        |
| 147 | 92 |     | U       | 50 572,2 (22)     |
| 146 | 93 |     | Np      | 49 306,4 (30)     |
| 145 | 94 | 243 | Pu      | 48 585,1 (24)     |
| 144 | 95 |     | Am      | 49 389 (5)        |
| 143 | 96 |     | Cm      | 51 090 (c)        |
| 142 | 97 |     | Bk      | 54 280 (c)        |
| 148 | 92 | 244 | U       | 52 712 (5)        |
| 147 | 93 |     | Np      | 52 210 (60)       |
| 146 | 94 |     | Pu      | 50 122,8 (23)     |
| 145 | 95 |     | Am      | 51 443 (20)       |
| 144 | 96 | 245 | Cm      | 51 712 (6)        |
| 143 | 97 |     | Bk      | 55 710 (c)        |
| 142 | 98 |     | Cf      | 58 030 (c)        |
| 148 | 93 |     | Np      | 54 310 (100)      |
| 147 | 94 | 246 | Pu      | 52 953,0 (23)     |
| 146 | 95 |     | Am      | 52 932,2 (23)     |
| 145 | 96 |     | Cm      | 53 606 (6)        |
| 144 | 97 |     | Bk      | 56 100 (c)        |
| 143 | 98 | 247 | Cf      | 59 190 (c)        |

| N   | Z   | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|-----|-----|---------|-------------------|
| 149 | 93  | 242 | Np      | 57 250 (с)        |
| 148 | 94  |     | Pu      | 54 715,0 (23)     |
| 147 | 95  |     | Am      | 55 462,7 (27)     |
| 146 | 96  |     | Cm      | 54 801,5 (24)     |
| 145 | 97  |     | Bk      | 57 800 (с)        |
| 144 | 98  | 243 | Cf      | 59 332 (33)       |
| 149 | 94  |     | Pu      | 57 752,5 (35)     |
| 148 | 95  |     | Am      | 57 170,1 (32)     |
| 147 | 96  |     | Cm      | 57 177,4 (26)     |
| 146 | 97  |     | Bk      | 58 685 (6)        |
| 145 | 98  | 244 | Cf      | 60 910 (с)        |
| 144 | 99  |     | Es      | 64 800 (с)        |
| 150 | 94  |     | Pu      | 59 803 (5)        |
| 149 | 95  |     | Am      | 59 878,6 (31)     |
| 148 | 96  |     | Cm      | 58 449,6 (23)     |
| 147 | 97  | 245 | Bk      | 60 646 (21)       |
| 146 | 98  |     | Cf      | 61 465 (6)        |
| 145 | 99  |     | Es      | 65 970 (с)        |
| 151 | 94  |     | Pu      | 63 157 (30)       |
| 150 | 95  |     | Am      | 61 897,3 (36)     |
| 149 | 96  | 246 | Cm      | 61 001,3 (29)     |
| 148 | 97  |     | Bk      | 61 811 (5)        |
| 147 | 98  |     | Cf      | 63 377 (6)        |
| 146 | 99  |     | Es      | 66 380 (с)        |
| 145 | 100 |     | Fm      | 70 020 (с)        |
| 152 | 94  | 247 | Pu      | 65 290 (50)       |
| 151 | 95  |     | Am      | 64 920 (50)       |
| 150 | 96  |     | Cm      | 62 616,0 (34)     |
| 149 | 97  |     | Bk      | 64 020 (с)        |
| 148 | 98  |     | Cf      | 64 096,2 (31)     |
| 147 | 99  | 248 | Es      | 67 930 (с)        |
| 146 | 100 |     | Fm      | 70 131 (36)       |
| 152 | 95  |     | Am      | 67 130 (с)        |
| 151 | 96  |     | Cm      | 65 530 (5)        |
| 150 | 97  |     | Bk      | 65 484 (6)        |
| 149 | 98  | 249 | Cf      | 66 150 (с)        |
| 148 | 99  |     | Es      | 68 550 (31)       |
| 147 | 100 |     | Fm      | 71 540 (с)        |
| 153 | 95  |     | Am      | 70 490 (с)        |
| 152 | 96  |     | Cm      | 67 389 (6)        |
| 151 | 97  | 250 | Bk      | 67 990 (с)        |
| 150 | 98  |     | Cf      | 67 243 (31)       |
| 149 | 99  |     | Es      | 70 220 (с)        |
| 148 | 100 |     | Fm      | 71 891 (21)       |
| 147 | 101 |     | Md      | 77 000 (с)        |
| 153 | 96  | 251 | Cm      | 70 748 (8)        |
| 152 | 97  |     | Bk      | 69 848,0 (35)     |
| 151 | 98  |     | Cf      | 69 721,6 (30)     |
| 150 | 99  |     | Es      | 71 116 (7)        |
| 149 | 100 |     | Fm      | 73 500 (с)        |
| 148 | 101 | 252 | Md      | 77 260 (с)        |
| 154 | 96  |     | Cm      | 72 986 (12)       |
| 153 | 97  |     | Bk      | 72 950 (5)        |
| 152 | 98  |     | Cf      | 71 169,8 (35)     |
| 151 | 99  |     | Es      | 73 170 (с)        |
| 150 | 100 | 253 | Fm      | 74 069 (31)       |
| 149 | 101 |     | Md      | 78 600 (с)        |
| 154 | 97  |     | Bk      | 75 250 (с)        |
| 153 | 98  |     | Cf      | 74 130 (5)        |
| 152 | 99  |     | Es      | 74 503 (8)        |

| N   | Z   | A   | Элемент | Дефект массы, кэВ |
|-----|-----|-----|---------|-------------------|
| 151 | 100 | 252 | Fm      | 76 000 (с)        |
| 150 | 101 |     | Md      | 79 030 (с)        |
| 155 | 97  |     | Bk      | 78 530 (с)        |
| 154 | 98  |     | Cf      | 76 031 (6)        |
| 153 | 99  |     | Es      | 77 150 (с)        |
| 152 | 100 | 253 | Fm      | 76 822 (33)       |
| 151 | 101 |     | Md      | 80 500 (с)        |
| 150 | 102 |     | No      | 82 862 (26)       |
| 155 | 98  |     | Cf      | 79 299 (10)       |
| 154 | 99  |     | Es      | 79 012,4 (35)     |
| 153 | 100 | 254 | Fm      | 79 346 (5)        |
| 152 | 101 |     | Md      | 81 240 (с)        |
| 151 | 102 |     | No      | 84 330 (с)        |
| 156 | 98  |     | Cf      | 81 342 (12)       |
| 155 | 99  |     | Es      | 81 992 (6)        |
| 154 | 100 | 255 | Fm      | 80 899 (5)        |
| 153 | 101 |     | Md      | 83 390 (с)        |
| 152 | 102 |     | No      | 84 729 (34)       |
| 156 | 99  |     | Es      | 84 080 (с)        |
| 155 | 100 |     | Fm      | 83 796 (5)        |
| 154 | 101 | 256 | Md      | 84 880 (с)        |
| 153 | 102 |     | No      | 86 870 (с)        |
| 152 | 103 |     | Lr      | 90 250 (с)        |
| 157 | 99  |     | Es      | 87 260 (с)        |
| 156 | 100 |     | Fm      | 85 481 (8)        |
| 155 | 101 | 257 | Md      | 87 420 (с)        |
| 154 | 102 |     | No      | 87 801 (40)       |
| 153 | 103 |     | Lr      | 91 820 (с)        |
| 157 | 100 |     | Fm      | 88 588 (10)       |
| 156 | 101 |     | Md      | 89 040 (с)        |
| 155 | 102 | 258 | No      | 90 223 (31)       |
| 154 | 103 |     | Lr      | 92 970 (с)        |
| 153 | 104 |     | —       | 95 950 (с)        |
| 157 | 101 |     | Md      | 91 820 (с)        |
| 156 | 102 |     | No      | 91 520 (с)        |
| 155 | 103 | 259 | Lr      | 94 820 (с)        |
| 154 | 104 |     | —       | 96 550 (с)        |
| 157 | 102 |     | No      | 94 026 (11)       |
| 156 | 103 |     | Lr      | 96 000 (с)        |
| 155 | 104 |     | —       | 98 500 (с)        |
| 157 | 103 | 260 | Lr      | 98 140 (с)        |
| 156 | 104 |     | —       | 99 230 (с)        |
| 155 | 105 |     | —       | 103 650 (с)       |
| 157 | 104 |     | —       | 101 250 (с)       |
| 156 | 105 |     | —       | 104 460 (с)       |
| 157 | 105 | 262 | —       | 106 040 (с)       |
| 157 | 106 |     | —       | 110 310 (с)       |

## 39.4. ПОРОГ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Если энергия реакции  $Q < 0$ , то реакция идет с поглощением энергии, и для того чтобы она началась, падающая частица должна обладать энергией, превышающей порог реакции:

$$E_{\text{пор}} = |Q| (M_1 + M_2) / M_2,$$

где  $M_1$  и  $M_2$  — массы частиц во входном канале реакции.

### 39.5. КУЛОНОВСКИЙ БАРЬЕР

Заряженные частицы, вступая в реакцию, должны преодолеть электростатическое отталкивание их зарядов — так называемый кулоновский барьер.

Высота кулоновского барьера ядра с зарядом  $Z_1 e$  и радиусом  $R_1$  для частицы с зарядом  $Z_2 e$  и радиусом  $R_2$  дается выражением

$$E_{Кул} = Z_1 Z_2 e^2 / (R_1 + R_2),$$

где  $R_1 + R_2 = R_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ ;  $R_0$  — постоянная, принимаемая обычно равной около 1 фм (1 фм =  $10^{-15}$  м);  $A_1$  и  $A_2$  — массовые числа взаимодействующих ядер.

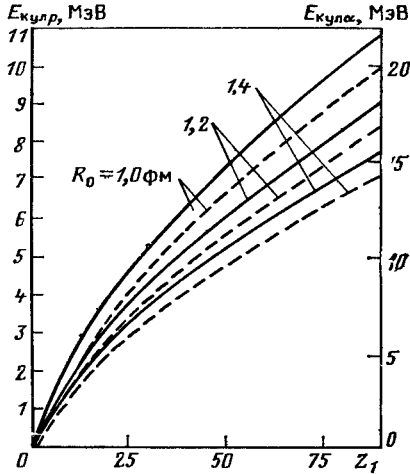


Рис. 39.1. Высота кулоновского барьера для протонов (сплошные кривые) и α-частиц (пунктир)

На рис. 39.1 приведен график зависимости высоты кулоновского барьера от  $Z_1$ , вычисленной на основе приведенных выше формул для наиболее распространенного изотопа данного элемента [2].

### 39.6. КИНЕМАТИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Под кинематикой ядерной реакции понимают соотношения между энергиями частиц, участвующих в реакции, а также соотношения между углами и сечениями в ЛСК и СЦМ (рис. 39.2).

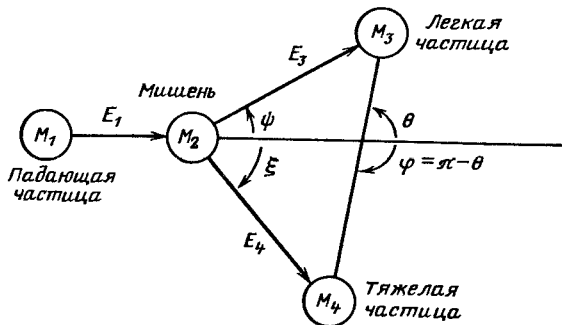


Рис. 39.2. Кинематическая схема ядерной реакции:  $M_i$  и  $E_i$  — массы и энергии участвующих частиц;  $\psi$  и  $\xi$  — углы разлета частиц в ЛСК;  $\theta$  и  $\varphi$  — в СЦМ

Ниже приведены наиболее важные кинематические уравнения для нерелятивистских и релятивистских энергий. Для частиц с нерелятивистской энергией справедливы уравнения

$$\begin{aligned} \sqrt{E_3} &= \frac{\sqrt{M_1 M_3 E_1}}{M_3 + M_4} \cos \psi \left( 1 \pm \left\{ 1 + \right. \right. \\ &+ \left. \frac{1 + M_4/M_3}{\cos^2 \psi} \left[ \frac{M_4}{M_1} \left( 1 + \frac{Q}{E_1} \right) - 1 \right]^{1/2} \right\} \right); \\ Q &= \frac{M_3 + M_4}{M_4} E_3 - \frac{M_4 - M_1}{M_4} E_1 - \\ &- \frac{\sqrt{M_1 M_3 E_1 E_3}}{M_4} \cos \psi. \end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:  $\psi$  и  $\xi$  — углы вылета частиц в ЛСК;  $\theta$  и  $\varphi$  — углы вылета в СЦМ;  $E_i$  — энергии частиц в ЛСК;  $E_i'$  — энергии в СЦМ;

$$Q = (M_1 + M_2 - M_3 - M_4) c^2 \text{ энергия реакции;}$$

$$E_T = E_1 + Q = E_3 + E_4;$$

$$A = \frac{M_1 M_4}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \frac{E_1}{E_T};$$

$$B = \frac{M_1 M_3}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \frac{E_1}{E_T};$$

$$C = \frac{M_2 M_3}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \frac{Q}{E_T} \right) = \frac{E_4'}{E_T};$$

$$D = \frac{M_2 M_4}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \frac{Q}{E_T} \right) = \frac{E_3'}{E_T};$$

$$A + B + C + D = 1; AC = BD.$$

Приведем расчетные формулы для кинематики ядерных реакций в нерелятивистском случае:

$$\begin{aligned} \text{Энергия легкой частицы в ЛСК} \quad E_3/E_T &= B + D + 2(AC)^{1/2} \times \\ &\times \cos \theta = B [\cos \psi \pm \\ &\pm (D/B - \sin^2 \psi)^{1/2}]^2 \end{aligned}$$

(если  $B \leq D$ , используется только знак плюс; если  $B > D$ , используются оба знака — в этом случае существует предельный угол вылета)

Энергия тяжелой частицы в ЛСК

$$\begin{aligned} E_4/E_T &= A + C + \\ &+ 2(AC)^{1/2} \cos \varphi = A [\cos \xi \pm \\ &\pm (C/A - \sin^2 \xi)^{1/2}]^2 \end{aligned}$$

(если  $A \leq C$ , используется только знак плюс; если  $A > C$ , используются оба знака — в этом случае существует предельный угол вылета)

Угол вылета тяжелой частицы в ЛСК

$$\sin \xi = \left( \frac{M_3 E_3}{M_4 E_4} \right)^{1/2} \sin \psi$$

Угол вылета легкой частицы СЦМ

$$\sin \theta = \left( \frac{E_3}{E_T D} \right)^{1/2} \sin \psi$$

Соотношения сечений и углов вылета в ЛСК и СЦМ для легкой частицы

$$\frac{\sigma(\theta)}{\sigma(\psi)} = \frac{\sin \psi d\psi}{\sin \theta d\theta} =$$

$$= \frac{\sin^2 \psi}{\sin^2 \theta} \cos(\theta - \psi) =$$

$$= \frac{(AC)^{1/2} (D/B - \sin^2 \psi)^{1/2}}{E_3/E_T}$$

Соотношения сечений и углов вылета в ЛСК и СЦМ для тяжелой частицы

$$\frac{\sigma(\varphi)}{\sigma(\xi)} = \frac{\sin \xi d\xi}{\sin \varphi d\varphi} =$$

$$= \frac{\sin^2 \xi}{\sin^2 \varphi} \cos(\varphi - \xi) =$$

$$= \frac{(AC)^{1/2} (C/A - \sin^2 \xi)^{1/2}}{E_4/E_T}$$

Соотношения сечений и углов вылета для частиц — продуктов реакции в ЛСК

$$\frac{\sigma(\xi)}{\sigma(\psi)} = \frac{\sin \psi d\psi}{\sin \xi d\xi} =$$

$$= \frac{\sin^2 \psi \cos(\theta - \psi)}{\sin^2 \xi \cos(\varphi - \xi)}$$

Для частиц с релятивистской энергией к введенным выше обозначениям добавляются:  $M$  — масса покоя, МэВ (т. е. скорость света  $c=1$ );  $T$  — кинетическая энергия;  $E=T+M$  — полная энергия;  $P=\sqrt{E^2-M^2}=\sqrt{T^2+2MT}$  — релятивистский импульс;

$$E_T = T_1 + M_1 + M_2;$$

$$A = 2M_2T_1 + 2M_1M_3 + 2M_2M_3 + 2Q(M_1 + M_2 - M_3) - Q^2;$$

$$B = E_T^2 - P_1^2 \cos^2 \psi; \partial B / \partial \psi = 2P_1^2 \sin \psi \cos \psi;$$

$$T_3 = E_3 - M_3 =$$

$$= (1/2B) [E_T A \pm P_1 \cos \psi] \sqrt{A^2 - 2M_3^2 B} - M_3;$$

$$T_4 = E_4 - M_4 = E_T - E_3 - (M_1 + M_2 - M_3 - Q);$$

$$Q = M_1 + M_2 - M_3 - [M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + 2M_2E_1 -$$

$$- 2E_3(E_1 + M_2) + 2P_1P_3 \cos \psi]^{1/2};$$

$$\xi = \sin^{-1} [(P_3/P_4) \sin \psi];$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial \psi} = -\frac{E_3}{B} \frac{\partial B}{\partial \psi} \pm \frac{P_1}{2B} \frac{A^2 + 4M_3^2(E_T^2 - 2B)}{\sqrt{A^2 - 4M_3^2 B}} \sin \psi;$$

$$E_{\text{пор}} = |Q| [(M_1 + M_2)/M_2 + |Q|/2M_2].$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wapstra A. N., Bos K. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1977. Vol. 19. P. 177—216.
2. Marion J. B., Young F. C. Nuclear Reaction Analysis: Graphs and Tables. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp. 1968.

## Глава 40 ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

А. И. Обухов, И. С. Григорьев

### 40.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Деление атомного ядра — это процесс распада на два (реже три и четыре) сравнимых по массе ядра — осколка деления. Впервые деление ядер наблюдалось при облучении ядер урана нейтронами [1], затем было обнаружено спонтанное деление ядер урана [2]. Для ядер с массовым числом  $A > 100$  реакция деления экзотермична, поскольку энергия связи, приходящаяся на один нуклон, в ядрах-осколках больше, чем в делящемся ядре. Освобождаемая при делении ядер энергия выделяется в виде кинетической энергии осколков, энергии, которая уносится нейтронами,  $\gamma$ -квантами,  $\beta$ -частицами и антинейтрино, сопровождающими процесс деления ядер.

Энергию возбуждения можно сообщить ядру облучением его  $\gamma$ -квантами или бомбардировкой его нейтронами и заряженными частицами высоких энергий, которые при неупругих соударениях передают ядру часть своей энергии. Особо важное значение имеет процесс деления ядер при захвате нейтронов.

Порог деления, вызванного  $\gamma$ -квантами, т. е. энергии наиболее низкоэнергетических  $\gamma$ -квантов, еще способных вызвать деление, является непосредственной мерой минимальной энергии возбуждения ядра, необходимой для деления. Порог реакции деления под дейст-

вием нейтронов меньше порога фотоделения составного ядра на энергию связи нейтрона с ядром мишени, вследствие чего некоторые из порогов реакции деления ядер под действием нейтронов отрицательны. Это означает, что процесс деления возможен при захвате ядрами тепловых и холодных нейтронов. Такие ядра называются хорошо делящимися ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ).

Кроме деления ядер под действием указанных механизмов возбуждения возможен процесс деления ядер без каких-либо видимых внешних воздействий на ядро. Такой процесс называют спонтанным делением ядер. Принято считать, что в невозбужденных ядрах (представляемых как маленькие капли) имеют место колебания с периодом  $10^{-20}$ — $10^{-21}$  с и амплитудой 0,1—0,2 радиуса ядра. Наличие барьера деления сдерживает самопроизвольный развал ядра, однако после огромного числа колебаний барьер может оказаться случайно пройденным посредством туннельного перехода. Времена жизни ядер по отношению к спонтанному делению изменяются от  $10^{21}$  лет для изотопов урана и тория до миллисекунд для ядер с зарядом  $Z=104 \div 107$ .

Образующиеся при делении тяжелого ядра осколки в большинстве случаев имеют разные массы; например, при делении ядер урана масса легкого осколка составляет 90—100 а.е.м., а масса тяжелого — 130—140 а.е.м.

Скорости осколков — порядка  $10^9$  см/с. Импульсы равны и противоположны по знаку. Скорость осколков достигает 0,9 конечного значения за время около  $10^{-20}$  с при расстоянии между ними порядка  $10^{-11}$  см, когда они еще находятся внутри наинизшей электронной оболочки атома.

Осколки деления первоначально находятся в возбужденных состояниях. Их суммарная энергия возбуждения примерно равна 20 МэВ. В первую очередь осколки за  $10^{-14}$ — $10^{-17}$  с сбрасывают лишние нейтроны (мгновенные нейтроны деления). Средняя энергия возбуждения осколка после испускания нейтронов равна половине энергии связи нейтрона и составляет для обоих осколков 6—7 МэВ. Эта энергия излучается в виде  $\gamma$ -квантов за  $10^{-9}$ — $10^{-14}$  с.

В начале своего пути осколки имеют положительный заряд от 10 до 20 электронных зарядов, так как некоторые из орбитальных электронов «стряхиваются» при делении. Проходя через вещество, осколки теряют свою энергию в основном на ионизацию среды. Вдоль пути двух осколков образуется примерно  $5 \cdot 10^6$  пар ионов. Время замедления осколков в воздухе порядка  $10^{-9}$  с, а в плотных средах —  $10^{-12}$  с. За это время они пробегают в воздухе расстояние около 2 см, а в плотных средах —  $10^{-3}$  см.

Заряд замедлившихся осколков сильно отличается от заряда стабильных нуклидов той же массы. Это различие уменьшается в серии  $\beta$ -распадов (обычно трех или четырех для каждого осколка).

В отдельных случаях  $\beta$ -распад продуктов деления приводит к высоковозбужденным состояниям дочернего ядра, для которых возможен выброс нейтрона. Так как константа распада по отношению к эмиссии этого «запаздывающего» нейтрона намного превышает константу  $\beta$ -распада, испускание нейтронов следует за  $\beta$ -распадом материнского ядра почти мгновенно и временная зависимость интенсивности запаздывающих нейтронов такая же, как у  $\beta$ -распада материнского ядра.

Более подробные сведения о делении ядер можно найти в [3—9].

## 40.2. БАРЬЕРЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Вероятность деления ядра (в капельной модели) при малых энергиях возбуждения  $E \ll E_0$  связывалась с проницаемостью потенциального барьера, зависимость которого от деформации ядра  $\delta$  вблизи вершины предполагалась примерно параболической:

$$U(\delta) = B_{\max} - \text{const}(\delta - \delta_0)^2,$$

где  $\delta_0$  — деформация, отвечающая максимальной высоте барьера  $B_{\max}$ .

Т а б л и ц а 40.1. Барьеры деления  $B_A$  и  $B_B$  и глубина второй ямы  $E_{II}$ , МэВ [10]. Здесь и далее в круглых скобках указаны погрешности

| Делящееся ядро    | $B_A$     | $E_{II}$      | $B_B$     |
|-------------------|-----------|---------------|-----------|
| $^{228}\text{Ra}$ | 8,0 (0,5) | —             | 8,5 (0,5) |
| $^{226}\text{Ac}$ | 6,0 (0,6) | —             | 7,7 (0,3) |
| $^{227}\text{Th}$ | 5,9 (0,3) | —             | 6,6 (0,3) |
| $^{228}\text{Th}$ | 6,2 (0,3) | —             | 6,5 (0,3) |
| $^{229}\text{Th}$ | —         | —             | 6,5 (0,3) |
| $^{230}\text{Th}$ | 6,1 (0,2) | —             | 6,5 (0,3) |
| $^{231}\text{Th}$ | 6,0 (0,1) | < 5,8         | 6,1 (0,3) |
| $^{232}\text{Th}$ | 5,8 (0,2) | < 4,5         | 6,2 (0,2) |
| $^{233}\text{Th}$ | 6,3 (0,2) | < 6,2         | 6,3 (0,2) |
| $^{234}\text{Th}$ | 6,1 (0,2) | —             | 6,5 (0,2) |
| $^{231}\text{Pa}$ | 5,9 (0,2) | —             | 5,9 (0,3) |
| $^{232}\text{Pa}$ | 6,1 (0,3) | < 5,7         | 6,2 (0,2) |
| $^{233}\text{Pa}$ | 6,1 (0,3) | —             | 6,1 (0,3) |
| $^{232}\text{U}$  | 5,2 (0,2) | —             | 5,1 (0,3) |
| $^{234}\text{U}$  | 5,6 (0,2) | —             | 5,5 (0,2) |
| $^{235}\text{U}$  | 5,9 (0,2) | $2,5 \pm 0,3$ | 5,6 (0,2) |
| $^{236}\text{U}$  | 5,6 (0,2) | $2,3 \pm 0,2$ | 5,5 (0,2) |
| $^{237}\text{U}$  | 6,1 (0,2) | $2,5 \pm 0,4$ | 5,9 (0,2) |
| $^{238}\text{U}$  | 5,7 (0,2) | $2,6 \pm 0,1$ | 5,7 (0,2) |
| $^{239}\text{U}$  | 6,3 (0,2) | $1,9 \pm 0,3$ | 6,1 (0,2) |
| $^{240}\text{U}$  | 5,7 (0,2) | —             | 5,5 (0,2) |
| $^{234}\text{Np}$ | 5,5 (0,2) | —             | 5,1 (0,2) |
| $^{235}\text{Np}$ | 5,5 (0,2) | —             | 5,2 (0,2) |
| $^{236}\text{Np}$ | 5,8 (0,2) | —             | 5,6 (0,2) |
| $^{237}\text{Np}$ | 5,7 (0,2) | $2,8 \pm 0,3$ | 5,4 (0,2) |
| $^{238}\text{Np}$ | 6,1 (0,2) | $2,3 \pm 0,3$ | 6,0 (0,2) |
| $^{239}\text{Np}$ | 5,9 (0,2) | —             | 5,4 (0,2) |
| $^{232}\text{Pu}$ | 5,3 (0,4) | —             | —         |
| $^{234}\text{Pu}$ | 5,8 (0,7) | —             | —         |
| $^{235}\text{Pu}$ | —         | $2,6 \pm 0,4$ | 5,1 (0,4) |
| $^{236}\text{Pu}$ | —         | —             | 4,5 (0,4) |
| $^{237}\text{Pu}$ | —         | $2,8 \pm 0,2$ | —         |
| $^{238}\text{Pu}$ | 5,5 (0,2) | $2,7 \pm 0,2$ | 5,0 (0,2) |
| $^{239}\text{Pu}$ | 6,2 (0,2) | $2,6 \pm 0,2$ | 5,5 (0,2) |
| $^{240}\text{Pu}$ | 5,6 (0,2) | $2,4 \pm 0,3$ | 5,1 (0,2) |
| $^{241}\text{Pu}$ | 6,1 (0,2) | $1,9 \pm 0,3$ | 5,4 (0,2) |
| $^{242}\text{Pu}$ | 5,5 (0,2) | —             | 5,1 (0,2) |
| $^{243}\text{Pu}$ | 5,9 (0,2) | $1,7 \pm 0,3$ | 5,2 (0,2) |
| $^{244}\text{Pu}$ | 5,4 (0,2) | —             | 5,0 (0,2) |
| $^{245}\text{Pu}$ | 5,6 (0,2) | —             | 5,0 (0,2) |
| $^{237}\text{Am}$ | —         | $2,4 \pm 0,2$ | —         |
| $^{238}\text{Am}$ | —         | $2,6 \pm 0,2$ | —         |
| $^{239}\text{Am}$ | 6,2 (0,3) | $2,4 \pm 0,2$ | —         |
| $^{240}\text{Am}$ | 6,5 (0,2) | $3,0 \pm 0,2$ | 5,2 (0,3) |
| $^{241}\text{Am}$ | 6,0 (0,2) | $2,2 \pm 0,2$ | 5,1 (0,3) |
| $^{242}\text{Am}$ | 6,5 (0,2) | $2,9 \pm 0,2$ | 5,4 (0,3) |
| $^{243}\text{Am}$ | 5,9 (0,2) | $2,3 \pm 0,2$ | 5,4 (0,3) |
| $^{244}\text{Am}$ | 6,3 (0,2) | $2,8 \pm 0,4$ | 5,4 (0,3) |
| $^{245}\text{Am}$ | 5,9 (0,2) | —             | 5,2 (0,3) |
| $^{247}\text{Am}$ | 5,5 (0,2) | —             | —         |
| $^{241}\text{Cm}$ | 6,3 (0,3) | $2,1 \pm 0,3$ | 4,3 (0,5) |
| $^{242}\text{Cm}$ | 5,8 (0,4) | —             | 4,0 (0,5) |
| $^{243}\text{Cm}$ | 6,4 (0,3) | $1,9 \pm 0,3$ | —         |
| $^{244}\text{Cm}$ | 5,8 (0,2) | —             | 4,3 (0,3) |
| $^{245}\text{Cm}$ | 6,2 (0,2) | $2,1 \pm 0,3$ | —         |
| $^{246}\text{Cm}$ | 5,7 (0,2) | —             | 4,2 (0,3) |
| $^{247}\text{Cm}$ | 6,0 (0,2) | —             | —         |
| $^{248}\text{Cm}$ | 5,7 (0,2) | —             | —         |
| $^{249}\text{Cm}$ | 5,6 (0,2) | —             | —         |
| $^{250}\text{Cm}$ | 5,3 (0,2) | —             | —         |
| $^{249}\text{Bk}$ | 6,1 (0,2) | —             | —         |
| $^{250}\text{Bk}$ | 6,1 (0,2) | —             | 4,1 (0,3) |

| Делящееся<br>ядро | $B_A$     | $E_{II}$ | $B_B$ |
|-------------------|-----------|----------|-------|
| $^{250}\text{Cf}$ | 5,6 (0,3) | —        | —     |
| $^{253}\text{Cf}$ | 5,4 (0,3) | —        | —     |
| $^{250}\text{Es}$ | 6,7       | —        | —     |
| $^{255}\text{Fm}$ | 5,7       | —        | —     |

Таблица 40.2. Высота барьеров деления  $B_{\max}$  ядер от  $^{213}\text{At}$  до  $^{153}\text{Tb}$  [11]

| Составное<br>ядро | $B_{\max}$ , МэВ | Составное<br>ядро | $B_{\max}$ , МэВ |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| $^{213}\text{At}$ | 17,3             | $^{197}\text{Au}$ | 23,4—25,1        |
| $^{212}\text{At}$ | 18,6             | $^{196}\text{Au}$ | 22,5—23,9        |
| $^{212}\text{Po}$ | 19,6             | $^{195}\text{Au}$ | 20,8—22,9        |
| $^{211}\text{Po}$ | 20,5—20,6        | $^{194}\text{Au}$ | 20,1—21,7        |
| $^{210}\text{Po}$ | 21,2             | $^{196}\text{Pt}$ | 24,9—26,3        |
| $^{209}\text{Po}$ | 21,1             | $^{194}\text{Pt}$ | 22,8—24,4        |
| $^{208}\text{Po}$ | 19,9             | $^{193}\text{Pt}$ | 22,7—24,2        |
| $^{207}\text{Po}$ | 19,3             | $^{192}\text{Pt}$ | 21,4—23,1        |
| $^{210}\text{Bi}$ | 24,2—24,4        | $^{191}\text{Pt}$ | 20,8—22,5        |
| $^{208}\text{Bi}$ | 23,6—24,1        | $^{191}\text{Ir}$ | 23,2             |
| $^{207}\text{Bi}$ | 22,8—22,9        | $^{190}\text{Ir}$ | 22,6—22,9        |
| $^{206}\text{Bi}$ | 22,4             | $^{189}\text{Ir}$ | 22,0—22,1        |
| $^{208}\text{Pb}$ | 27,4             | $^{188}\text{Ir}$ | 22,2             |
| $^{207}\text{Pb}$ | 26,9—27,0        | $^{190}\text{Os}$ | 25,6             |
| $^{206}\text{Pb}$ | 25,3             | $^{188}\text{Os}$ | 24,4             |
| $^{205}\text{Pb}$ | 24,6             | $^{187}\text{Os}$ | 24,6—24,8        |
| $^{204}\text{Pb}$ | 23,2—23,8        | $^{186}\text{Os}$ | 24,1             |
| $^{201}\text{Tl}$ | 23,1             | $^{185}\text{Os}$ | 24,0             |
| $^{200}\text{Tl}$ | 22,8             | $^{185}\text{Re}$ | 26,2             |
| $^{200}\text{Hg}$ | 23,5—24,6        | $^{184}\text{Re}$ | 26,3             |
| $^{199}\text{Hg}$ | 23,1—24,7        | $^{181}\text{Re}$ | 19,0 [12]        |
|                   |                  | $^{184}\text{W}$  | 28,3             |
| $^{198}\text{Hg}$ | 21,4—22,7        | $^{183}\text{W}$  | 28,3             |
| $^{197}\text{Hg}$ | 21,1—22,7        | $^{182}\text{W}$  | 27,4             |
| $^{196}\text{Hg}$ | 19,7—21,2        | $^{181}\text{W}$  | 26,9—27,0        |
|                   |                  | $^{180}\text{W}$  | 26,5—26,6        |
| $^{198}\text{Au}$ | 23,7—24,9        | $^{179}\text{W}$  | 25,8             |
|                   |                  | $^{179}\text{Ta}$ | 28,6             |
|                   |                  | $^{173}\text{Lu}$ | 30,5             |
|                   |                  | $^{173}\text{Yb}$ | 33,4             |
|                   |                  | $^{170}\text{Yb}$ | 30,6             |
|                   |                  | $^{153}\text{Tb}$ | 28,9 [12]        |

Обнаружение в недавнем времени ряда новых явлений (спонтанно делящихся изомеров, широких подбарьерных резонансов, групп узких резонансов с большой парциальной делимостью и других) привело к представлению о более сложной, двугорбой структуре барьера с максимумами высотой  $B_A$  и  $B_B$  при деформациях соответственно  $\delta_A \approx 0,4$  и  $\delta_B \approx 0,8$ . Седловина между максимумами располагается при значении  $\delta_{II} \approx 0,6$ , а дно этого минимума расположено на  $E_{II}$  выше основного состояния [10].

В табл. 40.1 приведены параметры двугорбой структуры барьеров тяжелых ядер ( $z \geq 88$ ), а в табл. 40.2 — значения  $B_{\max}$  для ядер с  $Z \leq 85$ , с одnogорбым барьером деления. Внутренний барьер  $B_A$  ядер от Th до Fm равен 5—6 МэВ.

Барьеры деления ядер с  $Z < 85$  увеличиваются с уменьшением  $Z^2/A$ . Для еще более легких ядер модель жидкой капли предсказывает увеличение барьера деления, прохождение его через максимум в области ядер молибдена и затем уменьшение до нуля при  $Z^2/A \rightarrow 0$ .

### 40.3. СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ

В табл. 40.3 и 40.4 приведены периоды спонтанного деления ядер из основного и изомерных состояний.

В табл. 40.3 приведены значения периодов спонтанного деления ядер из основного состояния изотопов трех природных и пятнадцати синтезированных элементов. Период полураспада уменьшается на  $\sim 31$  порядок от Th до Cu, а далее слабо изменяется. Там же приведены значения чисел мгновенных нейтронов и кинетической энергии парных осколков при спонтанном делении ядер. Кроме того, в таблицу включены сведения о новом типе радиоактивности — спонтанном расщеплении с испусканием фрагментов типа  $^{14}\text{C}$  в случае ядер франция и радия и  $^{24}\text{Ne}$  в случае урана. В этих случаях (отмеченных звездочкой) вместо  $T_{1/2}$  приведена доля распадов на тяжелые фрагменты по отношению к испусканию  $\alpha$ -частиц. В столбце  $E_k$  для этих случаев приведены значения кинетической энергии этих фрагментов.

В табл. 40.4 приведены значения периодов спонтанного деления из изомерного состояния во второй яме для ядер от U до Вк. В сравнении со спонтанным делением из основного состояния в первой яме спонтанное деление из изомерного состояния имеет гораздо меньшие времена жизни, что связано со значительно меньшими значениями величин и ширин внешнего барьера  $B_B$ .



Таблица 40.3. Периоды полураспада ядер  $T_{1/2}$  из основного состояния путем спонтанного деления, средние числа мгновенных нейтронов  $\bar{\nu}_{\text{МГН}}$  и средние кинетические энергии  $E_K$  осколков деления

| Элемент           | A   | $T_{1/2}$ [13—17]             | $\bar{\nu}_{\text{МГН}}$ [18] | $E_K$ , МэВ [19] |
|-------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| $^{87}\text{Fr}$  | 221 | $< 4,4 \cdot 10^{-12}^*$      | —                             | 31,3 [35]        |
| $^{88}\text{Ra}$  | 221 | $< 4,4 \cdot 10^{-12}^*$      | —                             | 32,4 [35]        |
|                   | 222 | $3,7 (6) \cdot 10^{-10}^*$    | —                             | 33,0 [35]        |
|                   | 223 | $6,1 (10) \cdot 10^{-10}^*$   | —                             | 31,9 [35]        |
|                   | 224 | $4,3 (12) \cdot 10^{-11}^*$   | —                             | 30,5 [35]        |
| $^{90}\text{Th}$  | 230 | $1,5 (15) \cdot 10^{17}$ лет  | $1,24 (15)^{*1}$ [20]         | —                |
|                   | 232 | $> 1,0 \cdot 10^{21}$ лет     | $2,13 (20)$ [21]              | —                |
| $^{91}\text{Pa}$  | 230 | $> 10^{16}$ лет [20]          | —                             | —                |
|                   | 231 | $1,1 \cdot 10^{16}$ лет       | —                             | —                |
| $^{92}\text{U}$   | 232 | $7,8 (60) \cdot 10^{13}$ лет  | —                             | —                |
|                   | 232 | $2,0 (5) \cdot 10^{-12}^*$    | —                             | 32,8 [36]        |
|                   | 233 | $1,2 (3) \cdot 10^{17}$ лет   | —                             | —                |
|                   | 234 | $1,42 (8) \cdot 10^{16}$ лет  | $1,63 (15)^{*1}$ [20]         | —                |
|                   | 235 | $9,8 (28) \cdot 10^{18}$ лет  | —                             | —                |
|                   | 236 | $2,43 (13) \cdot 10^{16}$ лет | $1,89 (5)$                    | —                |
|                   | 238 | $8,08 (26) \cdot 10^{15}$ лет | $1,98 (3)$                    | 168,2 (11)       |
|                   | 228 | $10^8$ лет [22]               | —                             | —                |
| $^{93}\text{Np}$  | 237 | $10^{18}$ лет                 | —                             | —                |
|                   | 239 | $> 5 \cdot 10^{12}$ лет [20]  | —                             | —                |
| $^{94}\text{Pu}$  | 236 | $3,5 (10) \cdot 10^9$ лет     | $2,21 (18)$                   | —                |
|                   | 238 | $4,77 (13) \cdot 10^{10}$ лет | $2,24 (8)$                    | —                |
|                   | 239 | $7,8 (16) \cdot 10^{15}$ лет  | —                             | —                |
|                   | 240 | $1,15 (4) \cdot 10^{11}$ лет  | $2,17 (1)$                    | 180,4 (3)        |
|                   | 241 | $> 3 \cdot 10^{15}$ лет       | —                             | —                |
|                   | 242 | $6,84 (8) \cdot 10^{10}$ лет  | $2,153 (19)$                  | 179,96 (20)      |
|                   | 244 | $6,56 (32) \cdot 10^{10}$ лет | $2,30 (19)$                   | 181,8 (10)       |
| $^{95}\text{Am}$  | 232 | $10^2$ лет [22]               | —                             | —                |
|                   | 234 | $10^4$ лет [22]               | —                             | —                |
|                   | 240 | $10^{14}$ лет [22]            | —                             | —                |
|                   | 241 | $1,06 (3) \cdot 10^{14}$ лет  | —                             | —                |
|                   | 242 | $8,8 (33) \cdot 10^{11}$ лет  | $2,42 (14)^{*1}$ [20]         | —                |
|                   | 243 | $3,35 (31) \cdot 10^{13}$ лет | —                             | —                |
|                   | 244 | $10^{14}$ лет [22]            | —                             | —                |
| $^{96}\text{Cm}$  | 240 | $1,9 \cdot 10^6$ лет          | —                             | —                |
|                   | 242 | $6,5 (6) \cdot 10^6$ лет      | $2,538 (12)$                  | —                |
|                   | 244 | $1,344 (2) \cdot 10^7$ лет    | $2,696 (10)$                  | 181,5 (10)       |
|                   | 246 | $1,81 (4) \cdot 10^7$ лет     | $2,950 (14)$                  | 184,2 (5)        |
|                   | 248 | $4,11 (4) \cdot 10^6$ лет     | $3,157 (15)$                  | 182,5 (9)        |
|                   | 250 | $1,13 (5) \cdot 10^4$ лет     | $3,17 (8)$                    | 179,1 (27)       |
| $^{97}\text{Bk}$  | 246 | $2 \cdot 10^{13}$ лет [22]    | —                             | —                |
|                   | 249 | $1,864 (87) \cdot 10^9$ лет   | $3,395 (26)$                  | —                |
| $^{98}\text{Cf}$  | 246 | $1,83 \cdot 10^3$ лет         | $3,14 (9)$                    | 196,6 (20)       |
|                   | 248 | $7 \cdot 10^3$ лет            | —                             | 189,3 (30)       |
|                   | 249 | $6,98 (15) \cdot 10^{10}$ лет | —                             | —                |
|                   | 250 | $1,70 (7) \cdot 10^4$ лет     | $3,51 (4)$                    | 187,0 (5)        |
|                   | 252 | $85,38 (39)$ года             | $3,7675 (40)$                 | 186,3 (10)       |
|                   | 254 | $0,1656 (5)$ года             | $3,83 (5)$                    | 188,3 (20)       |
| $^{99}\text{Es}$  | 253 | $6,42 (22) \cdot 10^5$ лет    | —                             | 191,3 (30)       |
|                   | 254 | $> 2,5 \cdot 10^7$ лет        | —                             | —                |
|                   | 255 | $2,44 (14) \cdot 10^3$ лет    | —                             | —                |
| $^{100}\text{Fm}$ | 242 | $0,82 \cdot 10^{-3}\text{с}$  | —                             | —                |
|                   | 244 | $3,3 \cdot 10^{-3}\text{с}$   | —                             | —                |
|                   | 246 | 15 с                          | —                             | 199,6 (40)       |
|                   | 248 | $3,6 \cdot 10^4$ с            | —                             | 198,7 (40)       |
|                   | 250 | 10 лет                        | —                             | —                |
|                   | 252 | 115 лет                       | —                             | —                |
|                   | 254 | 228(1) сут                    | $3,98 (19)$                   | 194,9 (10)       |
|                   | 255 | $\sim 10^4$ лет               | —                             | —                |
|                   | 256 | 2,6 ч                         | $3,74 (18)$                   | 198,2 (5)        |
|                   | 257 | 131 (3) год                   | $3,796 (14)$                  | 197,6            |
|                   | 258 | 0,38 мс                       | —                             | 238 [15]         |
|                   | 259 | 1,5 с                         | —                             | 245,2 (60)       |

| Элемент           | A   | $T_{1/2}$ [13–17]          | $\bar{\nu}_{\text{МГН}}$ [18] | $E_R$ , МэВ [19] |
|-------------------|-----|----------------------------|-------------------------------|------------------|
| $^{101}\text{Md}$ | 255 | $\geq 5 \cdot 10^{-2}$ лет | —                             | —                |
|                   | 256 | $\geq 10^{-2}$ лет         | —                             | —                |
|                   | 257 | $\geq 6$ сут               | —                             | —                |
|                   | 259 | 95 мин                     | —                             | 203,9 (14)       |
| $^{102}\text{No}$ | 250 | $0,25 \cdot 10^{-3}$ с     | —                             | —                |
|                   | 252 | $\sim 8$ с                 | 4,15 [23]                     | 202,4            |
|                   | 254 | $\sim 24$ ч                | —                             | —                |
|                   | 256 | $10^3$ с                   | —                             | —                |
|                   | 258 | $1,2 \cdot 10^{-3}$ с      | —                             | —                |
| $^{103}\text{Lr}$ | 256 | $\geq 10^5$ с              | —                             | —                |
| $^{104}\text{Ku}$ | 254 | $5 \cdot 10^{-4}$ с        | —                             | —                |
|                   | 255 | $\sim 4,5$ с               | —                             | —                |
|                   | 256 | $7 \cdot 10^{-3}$ с        | —                             | —                |
|                   | 257 | 47 с                       | —                             | —                |
|                   | 258 | $13(3) \cdot 10^{-3}$ с    | —                             | —                |
|                   | 259 | 3 с                        | —                             | —                |
|                   | 260 | 0,02–0,08 [16, 34]         | —                             | 199              |
|                   | 261 | 70 с                       | —                             | —                |
|                   | 262 | $47 \cdot 10^{-3}$ с       | —                             | —                |
|                   | 257 | $\geq 8$                   | —                             | —                |
| $^{105}\text{Ns}$ | 260 | $\sim 15$ с                | —                             | —                |
|                   | 261 | $\sim 7$ с                 | —                             | —                |
|                   | 262 | 47 с                       | —                             | —                |
| 106               | 259 | $> 2$ с                    | —                             | —                |
|                   | 260 | $7 \cdot 10^{-3}$ с        | —                             | —                |
| 107               | 263 | $\sim 1$ с                 | —                             | —                |
|                   | 261 | $10^{-2}$ с                | —                             | —                |

\*1 Значение экстраполировано от полученного при измерениях с тепловыми или быстрыми нейтронами.

Таблица 40.4. Периоды полураспада ядер  $T_{1/2}$  из изомерных состояний путем спонтанного деления [22, 24] (в тех случаях, когда к одному нуклиду приведены два значения  $T_{1/2}$ , они относятся к разным изомерным состояниям)

| Ядро              | $T_{1/2}$ , с        | Ядро              | $T_{1/2}$ , с           |
|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| $^{236}\text{U}$  | $1,16 \cdot 10^{-7}$ | $^{237}\text{Am}$ | $5 \cdot 10^{-9}$       |
| $^{238}\text{U}$  | $\geq 10^{-9}$       | $^{238}\text{Am}$ | $3,5 \cdot 10^{-5}$     |
|                   | $1,95 \cdot 10^{-7}$ | $^{239}\text{Am}$ | $1,6 \cdot 10^{-7}$     |
| $^{226}\text{Np}$ | 60                   | $^{240}\text{Am}$ | $9 \cdot 10^{-4}$       |
| $^{237}\text{Np}$ | $4 \cdot 10^{-8}$    | $^{241}\text{Am}$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$     |
| $^{235}\text{Pu}$ | $3 \cdot 10^{-8}$    | $^{242}\text{Am}$ | $1,4 \cdot 10^{-2}$     |
| $^{236}\text{Pu}$ | $3,4 \cdot 10^{-8}$  | $^{243}\text{Am}$ | $5,5 \cdot 10^{-6}$     |
| $^{236}\text{Pu}$ | $3,7 \cdot 10^{-11}$ | $^{244}\text{Am}$ | $1,0 \cdot 10^{-3}$     |
| $^{237}\text{Pu}$ | $1,1 \cdot 10^{-6}$  | $^{245}\text{Am}$ | $6,4 \cdot 10^{-7}$     |
| $^{237}\text{Pu}$ | $1,1 \cdot 10^{-7}$  | $^{246}\text{Am}$ | $7,3 \cdot 10^{-5}$     |
| $^{238}\text{Pu}$ | $6 \cdot 10^{-9}$    | $^{240}\text{Cm}$ | $5,5 \cdot 10^{-8}$     |
| $^{238}\text{Pu}$ | $5 \cdot 10^{-10}$   |                   | $10^{-11}$              |
| $^{239}\text{Pu}$ | $8 \cdot 10^{-6}$    | $^{241}\text{Cm}$ | $1,5 \cdot 10^{-8}$     |
| $^{240}\text{Pu}$ | $3,4 \cdot 10^{-9}$  | $^{242}\text{Cm}$ | $1,8 \cdot 10^{-7}$     |
| $^{241}\text{Pu}$ | $3 \cdot 10^{-8}$    |                   | $5 \cdot 10^{-11}$      |
|                   | $2,1 \cdot 10^{-5}$  | $^{243}\text{Cm}$ | $4,2 \cdot 10^{-8}$     |
| $^{242}\text{Pu}$ | $5 \cdot 10^{-8}$    | $^{244}\text{Cm}$ | $> 1 \cdot 10^{-7}$     |
|                   | $3,6 \cdot 10^{-9}$  |                   | $\leq 5 \cdot 10^{-12}$ |
| $^{243}\text{Pu}$ | $6 \cdot 10^{-8}$    | $^{245}\text{Cm}$ | $1,3 \cdot 10^{-8}$     |
| $^{244}\text{Pu}$ | $3,8 \cdot 10^{-10}$ | $^{242}\text{Bk}$ | $9,5 \cdot 10^{-9}$     |
| $^{245}\text{Pu}$ | $9 \cdot 10^{-8}$    |                   | $6 \cdot 10^{-7}$       |
| $^{232}\text{Am}$ | 85                   | $^{244}\text{Bk}$ | $8,2 \cdot 10^{-7}$     |
| $^{234}\text{Am}$ | 150                  | $^{245}\text{Bk}$ | $2 \cdot 10^{-9}$       |

#### 40.4. СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

В табл. 40.5 и 40.6 приведены сечения деления  $\sigma_f$  ядер под действием тепловых нейтронов. Значения, помеченные звездочкой, рекомендованы для энергии  $E_n = 0,0253$  эВ ( $v = 2200$  м/с);  $\bar{E}_n$  — средняя энергия нейтронов деления. Значения, отмеченные буквой р, получены для распределения нейтронов в реакторе. На рис. 40.1—40.4 даны зависимости  $\sigma_f(E_n)$  для основных делящихся ядер и  $^{238}\text{U}$ .

В табл. 40.6 представлены сечения делений ядер при облучении тепловыми нейтронами. С ростом энергии нейтронов сечения деления хорошо делящихся ядер таких как  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  сначала спадают, испытывая ряд резонансных подъёмов и при энергии нейтронов 1—5 МэВ образуют первое плато (рис. 40.1, 40.3, 40.4). Ядра второй группы, такие как  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  и другие, начинают хорошо делиться лишь при некоторой энергии выше  $E_n^{\text{пор}}$ . Их сечения деления сначала круто возрастают, а затем достигают насыщения, первого плато. При повышении энергии нейтронов свыше 5 МэВ характер изменения сечения деления двух групп ядер подобен: при энергиях нейтронов  $\sim 8$ —14 МэВ сечения деления образуют второе плато, затем третье и т. д.

При прецизионных измерениях в сечениях деления таких «пороговых» ядер как  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,

Т а б л и ц а 40.5. Сечения деления  $\sigma_f$  ядер под действием тепловых нейтронов и числа вторичных нейтронов  $\bar{\nu}_{MTH}$ , испускаемых на акт деления

| Ядро-мишень         | $\sigma_f, 10^{-28} \text{ м}^2$ [18] | $\bar{\nu}_{MTH}$ [6,18] |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| $^{223}\text{Ra}$   | 0,7 (3)                               | —                        |
| $^{226}\text{Ra}$   | $< 5 \cdot 10^{-5}$                   | —                        |
| $^{226}\text{Ra}$   | $< 2$                                 | —                        |
| $^{227}\text{Ac}$   | $< 2,9 \cdot 10^{-4}$                 | —                        |
| $^{227}\text{Th}$   | 202 (13)                              | —                        |
| $^{228}\text{Th}$   | $< 0,3$                               | —                        |
| $^{229}\text{Th}$   | 30,8 (15)                             | 2,08(2)                  |
| $^{230}\text{Th}$   | $< 1,2 \cdot 10^{-3}$                 | —                        |
| $^{232}\text{Th}$   | $2,5 \cdot 10^{-6}$                   | 2,12 (10)                |
| $^{233}\text{Th}$   | 15 (2)                                | —                        |
| $^{234}\text{Th}$   | $< 0,01$                              | —                        |
| $^{230}\text{Pa}$   | 1500 (250)                            | —                        |
| $^{231}\text{Pa}$   | 0,020 (1)                             | —                        |
| $^{232}\text{Pa}$   | 700 (100) p                           | —                        |
| $^{233}\text{Pa}$   | $< 0,1$                               | —                        |
| $^{234}\text{Pa}^m$ | 500                                   | —                        |
| $^{234}\text{Pa}^g$ | 5000                                  | —                        |
| $^{230}\text{U}$    | 25 (10)                               | —                        |
| $^{231}\text{U}$    | 400 (300)                             | —                        |
| $^{232}\text{U}$    | 76,8(48)*                             | —                        |
| $^{233}\text{U}$    | 529,1 (12)* [25]                      | 2,480 (7)                |
| $^{234}\text{U}$    | $< 0,65$                              | —                        |
| $^{235}\text{U}$    | 582,6 (11)* [25]                      | 2,407 (7)                |
| $^{236}\text{U}$    | 0,07*                                 | 2,338 (22)               |
| $^{237}\text{U}$    | $< 0,35$                              | —                        |
| $^{238}\text{U}$    | $(4 \div 11) \cdot 10^{-6}$           | —                        |
| $^{239}\text{U}$    | 14 (3)                                | —                        |
| $^{234}\text{Np}$   | 900 (300)                             | —                        |
| $^{236}\text{Np}$   | 2500 (150)                            | 3,12 (14)                |
| $^{237}\text{Np}$   | 0,0215 (24)*                          | 2,525 (16)               |
| $^{238}\text{Np}$   | 2088 (30)                             | —                        |
| $^{236}\text{Pu}$   | 170 (35)                              | —                        |
| $^{237}\text{Pu}$   | 2455 (295)                            | —                        |
| $^{238}\text{Pu}$   | 17,9 (4)*                             | 2,900 (20)               |
| $^{239}\text{Pu}$   | 748,0 (20)* [25]                      | 2,874 (7)                |
| $^{240}\text{Pu}$   | 0,056 (30)                            | 2,921 (12)               |
| $^{241}\text{Pu}$   | 1011,1 (62)* [25]                     | —                        |
| $^{242}\text{Pu}$   | 0,0007* [26]                          | —                        |
| $^{243}\text{Pu}$   | 196 (16)                              | —                        |
| $^{241}\text{Am}$   | 3,20 (9)*                             | —                        |
| $^{242}\text{Am}^m$ | 6950 (280)*                           | 3,260 (24)               |
| $^{242}\text{Am}^g$ | 2100 (200)                            | —                        |
| $^{243}\text{Am}$   | 0,1983 (43)                           | 3,214 (38)               |
| $^{244}\text{Am}^m$ | 1600 (300)                            | —                        |
| $^{244}\text{Am}^g$ | 2300 (300)                            | —                        |
| $^{242}\text{Cm}$   | $< 5$                                 | —                        |
| $^{243}\text{Cm}$   | 617 (20)*                             | 3,430 (40)               |
| $^{244}\text{Cm}$   | 1,04 (20)*                            | —                        |
| $^{245}\text{Cm}$   | 2145 (58)*                            | 3,717 (60)               |
| $^{246}\text{Cm}$   | 0,14 (5)*                             | —                        |
| $^{247}\text{Cm}$   | 81,9 (44)                             | 3,79 (15)                |
| $^{248}\text{Cm}$   | 0,37 (5)                              | —                        |
| $^{250}\text{Bk}$   | 960 (150)                             | —                        |
| $^{249}\text{Cf}$   | 1642 (33)*                            | 4,06 (4)                 |
| $^{251}\text{Cf}$   | 4895 (250)                            | —                        |
| $^{252}\text{Cf}$   | 32 (4)                                | —                        |
| $^{253}\text{Cf}$   | 1300 (240)                            | —                        |
| $^{254}\text{Es}^m$ | 1826 (80)                             | —                        |
| $^{254}\text{Es}^g$ | 1966 (160)                            | —                        |
| $^{255}\text{Fm}$   | 3360 (170)                            | —                        |
| $^{257}\text{Fm}$   | 2950 (160)                            | —                        |

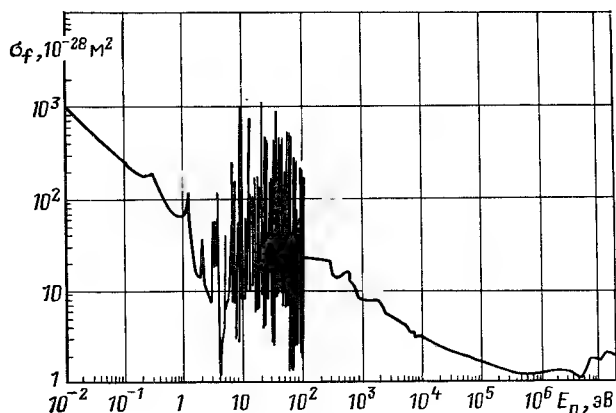


Рис. 40.1. Зависимость сечения деления  $^{235}\text{U}$  от энергии нейтронов [27]

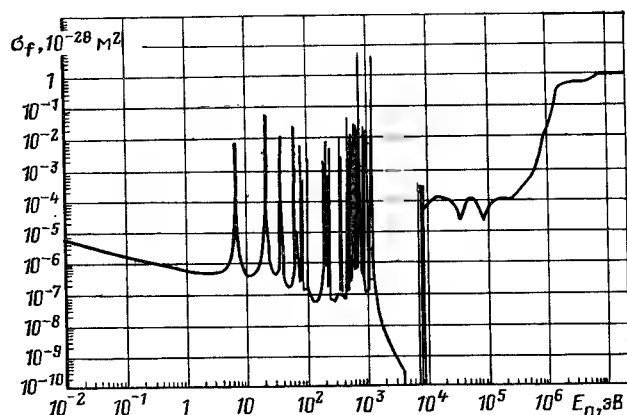


Рис. 40.2. Зависимость сечения деления  $^{238}\text{U}$  от энергии нейтронов [27]

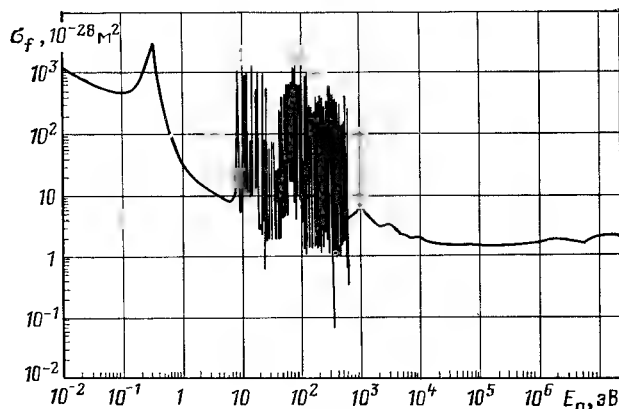


Рис. 40.3. Зависимость сечения деления  $^{239}\text{Pu}$  от энергии нейтронов [27]

$^{242}\text{Pu}$  была обнаружена промежуточная структура, а у ядер  $^{230}\text{Th}$  и других — подбарьерные резонансы. Пример промежуточной структуры в сечении деления ядер  $^{238}\text{U}$  приведен на рис. 40.2. Эти явления нашли объяснения в модели двугорбого барьера [3, 14]. В табл. 40.6 приведен ряд основных характеристик делящихся ядер при взаимодействии  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  с тепловыми нейтронами. Значения сечений деления основных делящихся ядер при взаимодействии с нейтронами 0,1—20 МэВ приведены в [3].

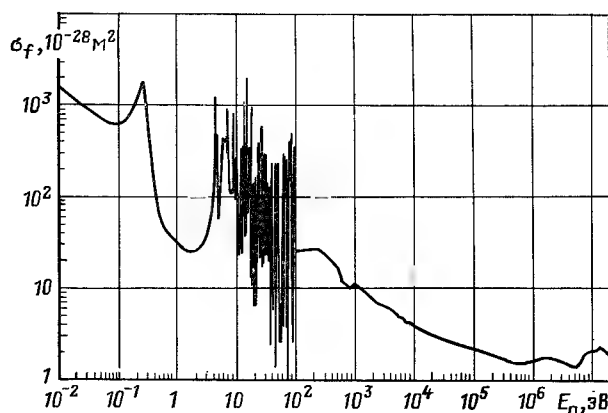


Рис. 40.4. Зависимость сечения деления  $^{241}\text{Pu}$  от энергии нейтронов [27]

Таблица 40.6. Константы взаимодействия делящихся ядер с нейтронами, имеющими скорость  $v = 2200$  м/с [25]

| Характеристика                                     | $^{233}\text{U}$ | $^{235}\text{U}$ | $^{239}\text{Pu}$ | $^{241}\text{Pu}$ |
|----------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| $\sigma_{\gamma}$ , $10^{-28}$ м <sup>2</sup>      | 45,5 (7)         | 98,3 (8)         | 269,3 (22)        | 358,2 (51)        |
| $\sigma_f$ , $10^{-28}$ м <sup>2</sup>             | 529,1 (12)       | 582,6 (11)       | 748,0 (20)        | 1011,1 (62)       |
| $\sigma_{\text{погл}}$ , $10^{-28}$ м <sup>2</sup> | 574,7 (10)       | 680,9 (11)       | 1017,3 (29)       | 1369,4 (77)       |
| $\gamma_{\text{мгн}}$ [6]                          | 2,480 (7)        | 2,407 (7)        | 2,874 (7)         | 2,921 (12)        |
| $\gamma_{\text{зап}}$                              | 0,0066 (30)      | 0,01659 (55)     | 0,00622 (32)      | 0,01563 (160)     |
| $\gamma_{\text{погл}}$                             | 2,4933 (39)      | 2,4251 (34)      | 2,8768 (57)       | 2,9369 (73)       |
| $\bar{E}_n$ , МэВ                                  | 2,0627 (248)     | 2,0266 (220)     | 2,0990 (232)      | 2,0858 (232)      |

#### 40.5. ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛЯЕМАЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ

Суммарная энергия, выделяемая при делении ядер, складывается из следующих составляющих:  
кинетической энергии осколков деления  $E_K$ ;

энергии мгновенных  $\gamma$ -квантов  $E_{\gamma}$  мгн;  
энергии нейтронов деления  $E_n$ ;  
энергии  $\beta$ -излучения продуктов деления  $E_{\beta}$ ;  
энергии  $\gamma$ -излучения продуктов деления  $E_{\gamma}$ ;  
энергии уносимой антинейтрино при  $\beta$ -распадах  $E_{\bar{\nu}}$ .

Таблица 40.7. Энергия, выделяющаяся при делении ядер, МэВ (среднее значение на одно деление; энергия, уносимая запаздывающими нейтронами,  $E_n$  зап  $\approx 10$  кэВ в табл. 40.7 не учтена)

| Ядро-мишень       | Частица и ее энергия, МэВ | Мгновенное излучение |       |              | Запаздывающее излучение |              |                 | $E_{\text{полн}}$ | Литература |
|-------------------|---------------------------|----------------------|-------|--------------|-------------------------|--------------|-----------------|-------------------|------------|
|                   |                           | $E_K$                | $E_n$ | $E_{\gamma}$ | $E_{\beta}$             | $E_{\gamma}$ | $E_{\bar{\nu}}$ |                   |            |
| $^{197}\text{Au}$ | $^{16}\text{O}$ , 135     | 156                  | 80    | 12           | 3                       | 4            | 5               | —                 | [9]        |
| $^{209}\text{Bi}$ | $^{22}\text{Ne}$ , 175    | 171                  | 90    | 12           | 3                       | 4            | 5               | —                 | [9]        |
| $^{226}\text{Ra}$ | $p$ , 12                  | 159                  | 20    | 6            | 5                       | 5            | 7               | —                 | [9]        |
| $^{232}\text{Th}$ | $n$ , 3,35                | 161,8                | 4,7   | 6,1          | 8,1                     | 7,86         | 10,9            | 199,46            | [7]        |
| $^{233}\text{U}$  | $n$ , 14,0                | 161,8                | 7,4   | 6,1          | 7,2                     | 6,99         | 9,7             | 199,14            | [7]        |
|                   | $n$ , тепловая            | 171,5                | 4,9   | 7,6          | 5,1                     | 4,9          | 6,8             | 200,8             | [7]        |
|                   | $n$ , 0,5                 | 169,4                | 4,9   | 7,6          | 5,0                     | 4,9          | 6,8             | 198,6             | [7]        |
|                   | $n$ , 14,0                | 169,4                | 7,5   | 7,6          | 4,3                     | 4,1          | 5,7             | 198,6             | [7]        |
| $^{235}\text{U}$  | $\alpha$ , 30             | 176                  | 36    | 8            | 3                       | 4            | 5               | —                 | [9]        |
|                   | $n$ , тепловая            | 172,7                | 4,8   | 6,9          | 6,4                     | 6,2          | 8,6             | 205,2             | [7]        |
|                   | $n$ , 0,5                 | 169,8                | 4,8   | 6,9          | 6,4                     | 6,2          | 8,6             | 202,8             | [7]        |
|                   | $n$ , 14,0                | 169,8                | 7,3   | 6,9          | 5,3                     | 5,2          | 7,1             | 201,7             | [7]        |
| $^{238}\text{U}$  | $n$ , 2,82                | 170,4                | 5,3   | 6,3          | 6,9                     | 6,7          | 9,3             | 204,6             | [7]        |
| $^{238}\text{U}$  | $n$ , 3,10                | 170,3                | 5,5   | 6,3          | 8,2                     | 8,0          | 11,0            | 209,3             | [7]        |
| $^{238}\text{U}$  | $n$ , 14,0                | 170,3                | 7,1   | 6,3          | 7,1                     | 6,9          | 9,5             | 207,2             | [7]        |
| $^{237}\text{Np}$ | $u$ , 2,37                | 173,0                | 6,1   | 6,4          | 5,5                     | 5,4          | 7,4             | 203,9             | [7]        |
| $^{239}\text{Pu}$ | $n$ , тепловая            | 178,6                | 5,9   | 7,8          | 5,3                     | 5,1          | 7,1             | 209,8             | [7]        |
|                   | $n$ , 0,5                 | 176,1                | 5,9   | 7,8          | 5,2                     | 5,1          | 7,0             | 207,2             | [7]        |
|                   | $n$ , 14,0                | 176,1                | 7,5   | 7,8          | 4,3                     | 4,2          | 5,7             | 205,5             | [7]        |
|                   | $n$ , 2,39                | 179,0                | 6,2   | 6,5          | 5,7                     | 5,6          | 7,7             | 207,7             | [7]        |

| Ядро-мишень       | Частица и ее энергия, МэВ | Мгновенное излучение |       |            | Запаздывающее излучение |            |              | $E_{\text{полн}}$ | Литература |
|-------------------|---------------------------|----------------------|-------|------------|-------------------------|------------|--------------|-------------------|------------|
|                   |                           | $E_K$                | $E_n$ | $E_\gamma$ | $E_\beta$               | $E_\gamma$ | $E_\gamma^-$ |                   |            |
| $^{241}\text{Pu}$ | $n$ , тепловая            | 175,4                | 6,0   | 7,9        | 6,5                     | 6,4        | 8,8          | 210,9             | [7]        |
|                   | $n$ , 0,5                 | 175,6                | 6,0   | 7,9        | 6,5                     | 6,3        | 8,7          | 211,0             | [7]        |
| $^{242}\text{Pu}$ | $n$ , 2,32                | 176,8                | 4,6   | 6,5        | 6,6                     | 6,4        | 8,9          | 209,9             | [7]        |
| $^{252}\text{Cf}$ | Спонтанное деление        | 190,0                | 7,4   | 8,4        | 6,0                     | 5,9        | 8,1          | 225,8             | [7]        |
| $^{256}\text{Fm}$ | То же                     | 198                  | 32    | 8          | 8                       | 8          | 12           | —                 | [9]        |

Энергия, уносимая антинейтрино, в виде тепловой не выделяется, поэтому на один акт деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами приходится около 196 МэВ, т. е. при мощности 1 Вт происходит примерно  $3,2 \cdot 10^{10}$  делений в секунду. При делении 1 кг  $^{235}\text{U}$  выделяется энергия  $8 \cdot 10^{13}$  Дж.

В табл. 40.7 и 40.8, а также на рис. 40.5 приведены значения энергий, выделяемых при делении различных ядер.

Таблица 40.8. Средняя суммарная кинетическая энергия осколков деления ядер при взаимодействии с тепловыми нейтронами [19]

| Ядро-мишень       | $E_K$ , МэВ | Ядро-мишень       | $E_K$ , МэВ |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| $^{229}\text{Th}$ | 162,7 (5)   | $^{243}\text{Am}$ | 177,5 (6)   |
| $^{231}\text{Pa}$ | 165,1 (5)   | $^{245}\text{Cm}$ | 184,5 (5)   |
| $^{232}\text{U}$  | 169,3 (5)   | $^{249}\text{Cf}$ | 189,4 (5)   |
| $^{237}\text{Np}$ | 171,0 (7)   | $^{251}\text{Cf}$ | 185,0 (27)  |
| $^{238}\text{Pu}$ | 178,1 (5)   | $^{254}\text{Es}$ | 194,6 (5)   |
| $^{241}\text{Am}$ | 180,0 (4)   | $^{255}\text{Fm}$ | 195,7 (29)  |

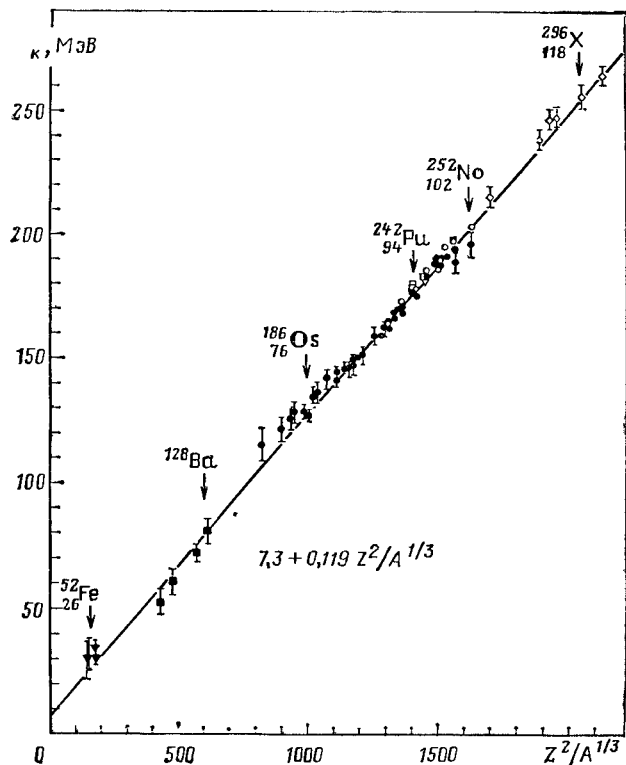


Рис. 40.5. Зависимость полной кинетической энергии  $E_K$  осколков деления от  $Z^2/A^{1/3}$  делящегося ядра [28]

#### 40.6. ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Независимым выходом называют непосредственный выход осколков при делении ядра. Полный выход (рис. 40.6) складывается из независимого выхода и той доли, которая образуется в результате цепочки  $\beta$ -распадов.

В табл. 40.9 даны пробеги осколков деления ядер.

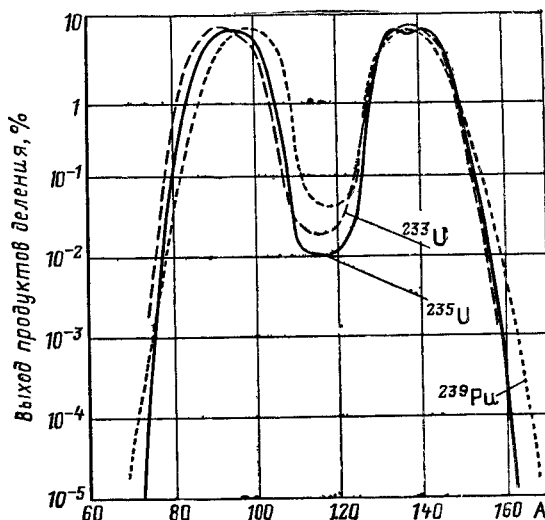


Рис. 40.6. Полные выходы продуктов деления, образующихся при делении  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  тепловыми нейтронами (вся кривая нормирована на 200%) [20]

Таблица 40.9. Средние пробеги осколков деления ядер  $\bar{R}$ , мг/см<sup>2</sup>, при торможении в различных средах [6]  
( $\bar{R}_L$  — пробег легкого осколка,  $\bar{R}_T$  — пробег тяжелого осколка)

| Тормозящая среда   | $^{235}\text{U} + \frac{1}{2}n_{\text{тепл}}$ |             |             | $^{252}\text{Cf}$ , спонтанное деление |             |
|--------------------|-----------------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------------------|-------------|
|                    | $\bar{R}$                                     | $\bar{R}_L$ | $\bar{R}_T$ | $\bar{R}_L$                            | $\bar{R}_T$ |
| Алюминий           | —                                             | 4,17        | 3,22        | 4,16                                   | 3,44        |
| Аргон [30]         | 4,123                                         | 4,45        | 3,84        | —                                      | —           |
| Вода               | 21 мкм [29]                                   | —           | —           | —                                      | —           |
| Воздух             | 2,16 см                                       | 2,45 см     | 2,03 см     | 2,32 см*2                              | 1,90 см*2   |
| Гелий [30]         | 1,252                                         | 1,38        | 1,14        | —                                      | —           |
| Железо             | 4,22                                          | —           | —           | —                                      | —           |
| Коллодий           | 20 мкм [29]                                   | —           | —           | —                                      | —           |
| Лавсан             | —                                             | 17,8 мкм*1  | 14,0 мкм*1  | —                                      | —           |
| Медь               | 5,08                                          | —           | —           | —                                      | —           |
| Никель             | 4,40                                          | 5,53        | 4,30        | 5,52                                   | 4,57        |
| Серебро            | —                                             | 7,33        | 5,50        | 7,28                                   | 5,82        |
| Углерод            | —                                             | 3,09        | 2,48        | —                                      | —           |
| Уран               | 6,7 мкм [29]                                  | 10,64*2     | 8,44*2      | —                                      | —           |
| Урана диоксид      | 9,9 мкм [29]                                  | —           | —           | —                                      | —           |
| Урана окись-закись | 13,7 мкм [29]                                 | —           | —           | —                                      | —           |
| Цирконий           | —                                             | 6,12        | 4,78        | —                                      | —           |

\*1 Пробеги осколков при фотоделении ядер,  $E_{\text{max}} = 20$  МэВ.

\*2 Пробеги осколков  $^{98}\text{Mo}$  ( $\bar{R}_L$ ) и  $^{140}\text{Ba}$  ( $\bar{R}_T$ ) соответственно.

## 40.7. НЕЙТРОНЫ ДЕЛЕНИЯ

Энергетические спектры мгновенных нейтронов деления различных ядер сходны. В простейшем виде, в пределах погрешностей эксперимента, спектры нейтронов деления могут быть представлены максвелловским распределением

$$N(E) = \left( \frac{2}{V\pi\theta^3} \right) V \bar{E} \exp(-E/\theta),$$

где  $E$  — энергия нейтрона в лабораторной системе координат, а параметр  $\theta$  связан со средней энергией спектра  $\bar{E}$ :  $\bar{E} = 3\theta/2$  (табл. 40.10).

Таблица 40.10. Средние энергии  $\bar{E}$  энергетических распределений мгновенных нейтронов для различных ядер

| Ядро              | Вид деления          | $\bar{E}$ , МэВ   |
|-------------------|----------------------|-------------------|
| $^{233}\text{U}$  | Тепловыми нейтронами | 2,0627 (248) [25] |
| $^{235}\text{U}$  | То же                | 2,0266 (220) [25] |
| $^{239}\text{Pu}$ | »                    | 2,0990 (232) [25] |
| $^{240}\text{Pu}$ | Спонтанное           | 1,86 [20]         |
| $^{241}\text{Pu}$ | Тепловыми нейтронами | 2,0858 (232) [25] |
| $^{252}\text{Cf}$ | Спонтанное           | 2,1409            |

Среднее число мгновенных нейтронов  $\bar{\nu}_{\text{мгн}}$ , возникающих при делении ядра, имеет тенденцию увеличиваться с возрастанием энергии нейтронов  $E_n$ , вызывающих деление (рис. 40.7). Эта зависимость может быть представлена выражением  $\bar{\nu}(E_n) = \bar{\nu}_0 + aE_n$ , где  $\bar{\nu}_0$  — среднее число мгновенных нейтронов при делении тепловыми нейтронами. Параметр  $a \approx 0,15$ , он слабо зависит от энергии нейтрона.

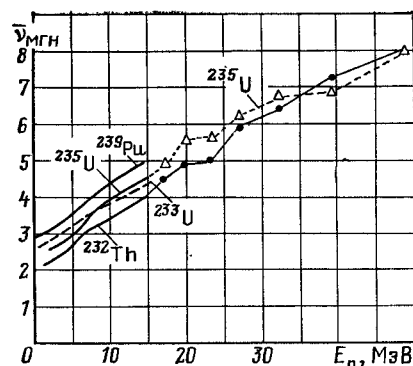


Рис. 40.7. Среднее число мгновенных нейтронов деления  $^{232}\text{Th}$  [21, 31],  $^{233}\text{U}$  [20],  $^{235}\text{U}$  [23, 31],  $^{239}\text{Pu}$  [23, 32]

## 40.8. МГНОВЕННОЕ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЕ

Энергия возбуждения осколков деления, остающаяся после испускания мгновенных нейтронов, обычно равна 3—4 МэВ/осколок. Это возбуждение осколков снимается испусканием мгновенных  $\gamma$ -квантов. Процесс излучения происходит за время порядка  $10^{-9}$ — $10^{-14}$  с вслед за испусканием нейтронов.

Спектр  $\gamma$ -квантов и полные энергии  $E_{\gamma}$  полн мгновенных  $\gamma$ -квантов, образующихся при делении некоторых ядер, приведены в табл. 40.11 и 40.12.

Таблица 40.11. Спектр мгновенных  $\gamma$ -квантов, сопровождающих деление  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами [20] [ $N(E_\gamma)$  — число  $\gamma$ -квантов, испускаемых при делении внутри энергетического интервала шириной 0,1 МэВ,  $E_{\text{эф}} = E_\gamma N(E_\gamma)$ ]

| $E_\gamma$ , МэВ | $N(E_\gamma)$ | $E_{\text{эф}}$ , МэВ/деление |
|------------------|---------------|-------------------------------|
| 0,1              | 0,176         | 0,0176                        |
| 0,2              | 0,815         | 0,1630                        |
| 0,3              | 0,697         | 0,2091                        |
| 0,4              | 0,661         | 0,2644                        |
| 0,5              | 0,662         | 0,3110                        |
| 0,6              | 0,553         | 0,3318                        |
| 0,7              | 0,474         | 0,3318                        |
| 0,8              | 0,408         | 0,2464                        |
| 0,9              | 0,353         | 0,3177                        |
| 1,0              | 0,310         | 0,310                         |
| 1,1              | 0,272         | 0,2992                        |
| 1,2              | 0,240         | 0,2880                        |
| 1,3              | 0,205         | 0,2665                        |
| 1,4              | 0,180         | 0,2520                        |
| 1,5              | 0,158         | 0,2370                        |
| 1,6              | 0,139         | 0,2224                        |
| 1,7              | 0,125         | 0,2125                        |
| 1,8              | 0,113         | 0,2034                        |
| 1,9              | 0,102         | 0,1938                        |
| 2,0              | 0,113         | 0,2260                        |
| 2,1              | 0,0818        | 0,1718                        |
| 2,2              | 0,0726        | 0,1597                        |
| 2,3              | 0,0651        | 0,1497                        |
| 2,4              | 0,0579        | 0,1390                        |
| 2,5              | 0,0512        | 0,1280                        |
| 2,6              | 0,0457        | 0,1188                        |
| 2,7              | 0,0409        | 0,1104                        |
| 2,8              | 0,0369        | 0,1033                        |
| 2,9              | 0,0330        | 0,0957                        |
| 3,0              | 0,0298        | 0,0894                        |
| 3,1              | 0,0268        | 0,0831                        |
| 3,2              | 0,0244        | 0,0781                        |
| 3,3              | 0,0219        | 0,0723                        |
| 3,4              | 0,0198        | 0,0673                        |
| 3,5              | 0,0181        | 0,0634                        |
| 3,6              | 0,0165        | 0,0594                        |
| 3,7              | 0,0150        | 0,0555                        |
| 3,8              | 0,0136        | 0,0517                        |
| 3,9              | 0,0126        | 0,0491                        |
| 4,0              | 0,0116        | 0,0464                        |
| 4,1              | 0,0106        | 0,0435                        |
| 4,2              | 0,00985       | 0,0414                        |
| 4,3              | 0,00908       | 0,0391                        |
| 4,4              | 0,00830       | 0,0365                        |
| 4,5              | 0,00764       | 0,0344                        |
| 4,6              | 0,00704       | 0,0324                        |
| 4,7              | 0,00649       | 0,0305                        |
| 4,8              | 0,00604       | 0,0290                        |
| 4,9              | 0,00556       | 0,0272                        |
| 5,0              | 0,00519       | 0,0260                        |
| 5,1              | 0,00470       | 0,0240                        |
| 5,2              | 0,00430       | 0,0224                        |
| 5,3              | 0,00399       | 0,0217                        |
| 5,4              | 0,00371       | 0,0200                        |
| 5,5              | 0,00341       | 0,0188                        |
| 5,6              | 0,00314       | 0,0176                        |
| 5,7              | 0,00290       | 0,0165                        |
| 5,8              | 0,00264       | 0,0153                        |
| 5,9              | 0,00243       | 0,0143                        |

Продолжение табл. 40.11

| $E_\gamma$ , МэВ | $N(E_\gamma)$ | $E_{\text{эф}}$ , МэВ/деление |
|------------------|---------------|-------------------------------|
| 6,0              | 0,00223       | 0,0134                        |
| 6,1              | 0,00204       | 0,0124                        |
| 6,2              | 0,00188       | 0,0117                        |
| 6,3              | 0,00172       | 0,0108                        |
| 6,4              | 0,00157       | 0,0100                        |
| 6,5              | 0,00139       | 0,0090                        |
| 6,6              | 0,00128       | 0,0084                        |
| 6,7              | 0,00115       | 0,0077                        |
| 6,8              | 0,00103       | 0,0070                        |
| 6,9              | 0,000916      | 0,0063                        |
| 7,0              | 0,000833      | 0,0058                        |
| 7,1              | 0,000731      | 0,0052                        |
| 7,2              | 0,000629      | 0,0045                        |
| 7,3              | 0,000547      | 0,0040                        |
| 7,4              | 0,000467      | 0,0034                        |
| 7,5              | 0,000388      | 0,0029                        |
| 7,6              | 0,000308      | 0,0023                        |

Таблица 40.12. Полная энергия  $E_{\gamma \text{ полн}}$  мгновенных  $\gamma$ -квантов, образующихся при делении некоторых ядер [20] ( $\bar{N}_\gamma$  — среднее число  $\gamma$ -квантов, приходящихся на одно деление,  $E_n$  — энергия нейтронов, вызывающих деление)

| Ядро              | $E_n$ , МэВ        | $\bar{N}_\gamma$ | $E_{\gamma \text{ полн}}$ , МэВ |
|-------------------|--------------------|------------------|---------------------------------|
| $^{235}\text{U}$  | Тепловая           | 7,4 (8)          | 7,2 (8)                         |
|                   | 2,8                | —                | 7,5 (11)                        |
| $^{238}\text{U}$  | 14,7               | —                | 7,5 (11)                        |
|                   | 2,8                | —                | 7,5 (11)                        |
| $^{252}\text{Cf}$ | 14,7               | —                | 7,5 (11)                        |
|                   | Спонтанное деление | 10,3             | 8,2                             |

#### 40.9. ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

$\beta$ - и  $\gamma$ -Излучение продуктов деления.  $\beta$ - и  $\gamma$ -Излучение продуктов деления является следствием распада более 100 радионуклидов, поэтому часто рассматривают совокупное  $\beta$ - или  $\gamma$ -излучение в момент времени  $t$  после деления, усредненное по многим актам деления. Зависимость интенсивности распада, МэВ·с<sup>-1</sup>·деление<sup>-1</sup>, продуктов деления от времени может быть приближенно представлена выражениями

$$A_\beta(t) \approx 1,4 t^{-1,2}; A_\gamma(t) \approx 8,2 t^{-1,2},$$

где  $t$  — время после деления, с. Эти выражения справедливы для интервала  $10 < t < 10^7$  с с погрешностью  $\pm 20\%$  (рис. 40.8—40.10).

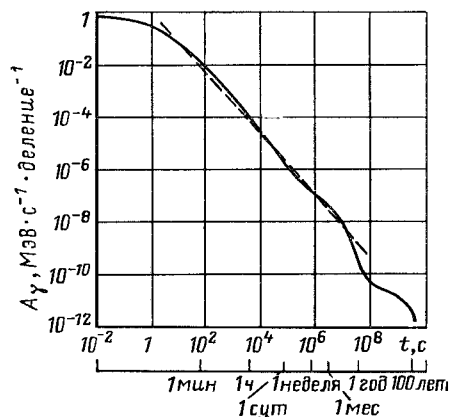


Рис. 40.8. Зависимость интенсивности  $\gamma$ -излучения продуктов деления от времени [20]

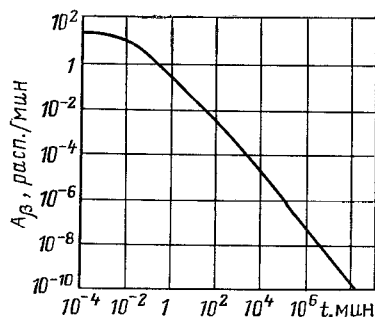
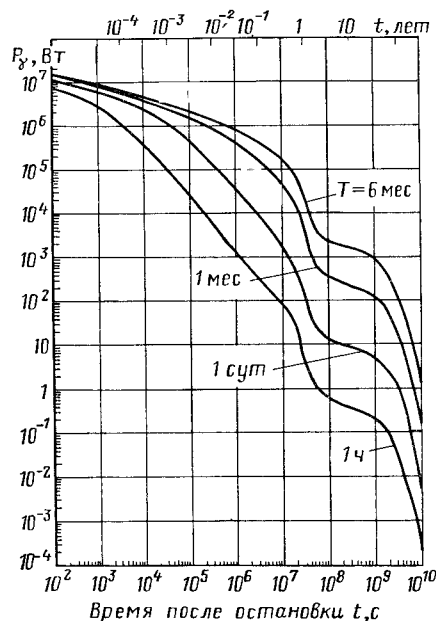


Рис. 40.9. Зависимость интенсивности  $\beta$ -излучения продуктов деления от времени [20]



**Запаздывающие нейтроны.** Нейтроны, испускаемые возбужденными осколками деления, в соответствии с периодами полураспада родоначальников запаздывающих нейтронов условно делятся на группы. Чаще выделяют шесть групп (см., например, рис. 40.11 и табл. 40.13). Родоначальниками запаздывающих нейтро-

Таблица 40.13. Относительный  $I_{\text{отн}}$  выход запаздывающих нейтронов в группах на один акт деления при делении изотопов урана и плутония тепловыми нейтронами [20]

| Нуклид            | Номер группы | $T_{1/2}, \text{с}$ | $I_{\text{отн}}$ |
|-------------------|--------------|---------------------|------------------|
| $^{233}\text{U}$  | 1            | 55,00 (54)          | 0,086            |
|                   | 2            | 20,57 (38)          | 0,299            |
|                   | 3            | 5,00 (21)           | 0,252            |
|                   | 4            | 2,13 (20)           | 0,278            |
|                   | 5            | 0,615 (242)         | 0,051            |
|                   | 6            | 0,277 (47)          | 0,034            |
| Полный выход      |              |                     | 1,000            |
| $^{235}\text{U}$  | 1            | 55,72 (128)         | 0,033            |
|                   | 2            | 22,72 (71)          | 0,219            |
|                   | 3            | 6,22 (23)           | 0,196            |
|                   | 4            | 2,30 (9)            | 0,395            |
|                   | 5            | 0,610 (83)          | 0,11             |
|                   | 6            | 0,230 (25)          | 0,042            |
| Полный выход      |              |                     | 1,000            |
| $^{239}\text{Pu}$ | 1            | 54,28 (234)         | 0,035            |
|                   | 2            | 23,04 (1,67)        | 0,298            |
|                   | 3            | 5,60 (40)           | 0,211            |
|                   | 4            | 2,13 (24)           | 0,326            |
|                   | 5            | 0,618 (213)         | 0,086            |
|                   | 6            | 0,257 (45)          | 0,044            |
| Полный выход      |              |                     | 1,000            |
| $^{241}\text{Pu}$ | 1            | 54,0 (10)           | 0,009            |
|                   | 2            | 23,2 (5)            | 0,233            |
|                   | 3            | 5,6 (6)             | 0,176            |
|                   | 4            | 1,97 (10)           | 0,397            |
|                   | 5            | 0,43 (4)            | 0,185            |
|                   | 6            | —                   | —                |
| Полный выход      |              |                     | 1,000            |

нов обычно называют первые  $\beta$ -активные осколки деления, а продукты распада осколков называются излучателями запаздывающих нейтронов. Периоды полураспада и выходы нейтронов для одного и того же делящегося ядра слабо зависят от энергии нейтрона (до  $E \approx 5$  МэВ), вызывающего деление. Полные выходы запаздывающих нейтронов приведены в табл. 40.14 и на рис. 40.12.

Рис. 40.10. Мощность источников  $\gamma$ -излучения — продуктов деления из активной зоны реактора, работавшего в течение времени  $T$  с тепловой мощностью 1 ГВт [33]



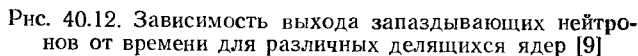
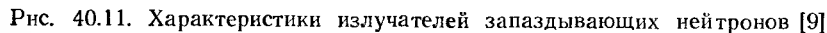


Таблица 40.14. Число запаздывающих нейтронов на 100 делений и средняя энергия запаздывающего нейтрона  $E_{\text{п. зап}}$  [32] ( $\Gamma$ ), ( $\rho$ ), ( $\lambda$ ) означают деление ядер при облучении тепловыми, реакторными нейтронами и нейтронами с энергией 14 МэВ соответственно, (сп) — спонтанное деление ядра

1098

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hahn O., Strassmann F. // *Naturwissenschaften*, 1939 P. 27, Heft 1. S. 11—15.
2. Флеров Г. Н., Петражак К. А. // *Журн. эксперим. теорет. физ.* 1940. Т. 10, вып. 9—10. С. 1013—1017
3. Обухов А. И., Перфилов Н. А. // *Успехи физ. наук*. 1967. Т. 92, вып. 4. С. 621—677.
4. Хайд Э. Деление ядер: Пер. с англ./Под. ред. В. М. Струтинского. М.: Атомиздат, 1969.
5. Vandenbosch R., Huisenga J. R. *Nuclear Fission*. N. Y. — London: Academic Press, 1973.
6. Горбачев В. М., Замятин Ю. С., Лбов А. А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер: Справочник. М.: Атомиздат, 1976.
7. Michaudon A. *Basic Physics of the Fission Process. Nuclear Fission and Neutron-Induced Fission Cross Sections*/Ed. by A. Michaudon. Oxford. Pergamon Press, 1981
8. Пик-Пичак Г. А. Деление ядер // *Физическая энциклопедия*. М.: Сов. энциклопедия, 1988. Т. 1. С. 578—581
9. Гангский Ю. П., Далхсунен Б., Марков Б. Н. Осколки деления ядер. М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Bjornholm S., Lynn J. E. // *Rev. Mod. Phys.* 1980. Vol. 52, N 4. P. 725—931.
11. Игнатюк А. В., Смиренин Г. Н., Иткин М. Г. и др. // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 1985. Т. 16, вып. 4. С. 709—772.
12. Plasil F., Awes T. C., Cheynis B. e. a. // *Phys. Rev. C*. 1984. Vol. 29, № 3. P. 1145—1148.
13. Proposed Recommended List of Heavy Elements Radionuclide Decay Data//Ed. by A. Lorenz. INDC (NDC)—149/NE. Vienna. IAEA, 1983. Part 1. Half-Lives. P. 5—12
14. Brown E., Firestone R. B. *Tables of Radioactive Isotopes*/Ed. V. C. Shirley. N. Y.: A. Wiley—Interscience Publ. 1986.
15. Tuli J. K. *Nuclei properties*//Handbook on Nuclear Activation Data Tech. Rep. Vienna: IAEA, 1987 Ser. N 273. P. 3—27.
16. Sommerville L. P., Nurmia M. J., Nitschke J. M. e. a. // *Phys. Rev. C*. 1985. Vol. 31, N 5. 1801—1815.
17. Дружинин А. А., Полюнов В. Н., Корочкин А. Н. и др. // *Атомная энергия*. 1985. Т. 56, вып. 1. С. 68—69.
18. Mughabghab S. F. *Neutron Gross Section*. BNL-325. N. Y.: Academic Press, 1984. Vol. 1. Neutron

Resonances Parameters and Thermal Cross Sections. Part B:  $Z=61 \div 100$ .

19. Воробьева В. Г., Кузьминов Б. Д. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы*. 1975. Вып. 19. С. 16—41; 1985. Вып. 2. С. 27—30.
20. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
21. Малиновский В. В., Тараско М. З., Кузьминов Б. Д. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы*. 1985. Вып. 1. С. 24—35; Вып. 2. С. 36—41; *Атомная энергия*. 1985. Т. 58, вып. 6. С. 430.
22. Флеров Г. Н. // *Производство изотопов*/Под ред. В. В. Бочкарева, Н. Е. Брежнева, Е. Е. Кулиша и др. М.: Атомиздат, 1973. С. 19—25.
23. Малиновский В. В., Воробьева В. Г., Кузьминов Б. Д. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы*. 1983. Вып. 5. С. 19—56.
24. Metag V. // *Comments Nucl. Particle Phys.* 1981. Vol. 10, N 2. P. 79—90.
25. Devadeenam M., Stehn J. R. // *Ann. Nucl. Energy*. 1984. Vol. 11, N 8. P. 375—404.
26. Коньшин В. А. *Ядерно-физические константы действующих ядер: Справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1984
27. Asami T. *Graphs of Evaluated Neutron Cross Sections in JENDL-2, JAERI-H-84-052*. Japanese Nuclear Data Committee, Toaki, Ibaraki, 1984.
28. Viola V. E., Kwiatkowski K., Walker M. // *Phys. Rev. C*. 1985. Vol. 31, N 44. P. 1550—1552.
29. Steinberg M. // *Nucleonics*. 1963. Vol. 21, N 8. P. 151—153.
30. Rustichelli F. // *Z. Phys.* 1973. Bd 262, N 3. S 211—220.
31. Howe R. E. // *Nucl. Sci. Engng.* 1984. Vol. 86, N 2. P. 157—167.
32. England T. R., Wilson W. B., Scheuter R. E., Mann F. M. // *Nucl. Sci. Engng.* 1983. Vol. 85, N 2. P. 139—155.
33. Бродер Д. Л., Попков К. К., Рубанов С. Н. *Малогобаритная защита реакторов*. М.: Атомиздат, 1967.
34. Друин В. А., Бочев Б., Короткин Ю. С. // *Атомная энергия*. 1977. Т. 43, вып. 3. С. 155—161.
35. Price P. B., Stevenson J. D., Barwick S. W. e. a. // *Phys. Rev. Lett.* 1985. Vol 54, N 4. P. 297—299.
36. Barwick S. W., Price P. B., Stevenson J. D. e. a. // *Phys. Rev. C*. 1985. Vol. 31, N 5. P. 1984—1986.

## Глава 41

## ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

С. В. Марин

### 41.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В главе представлены ядерно-физические константы, характеризующие взаимодействие нейтронов с ядрами среды в энергетической области от 0,0253 эВ примерно до 20 МэВ. Перечень приводимых ядерно-физических констант далеко не полностью отражает всю совокупность существующих в настоящее время данных, и поэтому для получения информации, например, по параметрам резонансов, угловым и энергетическим распределениям вторичных нейтронов или другим данным следует обратиться к специальной справочной литературе или к библиотекам оцененных нейтронных данных. В них приводятся рекомендованные значения ядерно-физических констант в форме, допускающей их

периодическую переоценку, пригодные для использования в расчетах при решении широкого круга задач. К наиболее известным библиотекам оцененных нейтронных данных относятся ENDF/B [1], ENDL [2], UKNDL [3], KEDAK [4] и др. При поиске требуемой информации рекомендуется пользоваться библиографическим указателем по нейтронным данным CINDA — Computer Index of Neutron Data [5], принятым в 1965 г. в качестве основного документа для международного обмена библиографической информацией. Подробное описание механизма ядерных реакций с участием нейтронов можно найти в работах по ядерной и нейтронной физике (см., например, [6—11]). Решение задач переноса нейтронов наиболее полно изложено в литературе по физике и технике ядерных реакторов [12—16].

## 41.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНА

При рассмотрении процесса переноса нейтронов в среде учитывается, что времена, характерные для взаимодействий нейтрона с ядрами среды, значительно меньше его периода полураспада. Поэтому нейтрон в данном случае считается долгоживущей и устойчивой частицей.

В свободном состоянии нейтрон радиоактивен. Ниже приведены основные характеристики нейтрона:

масса покоя  $m_n = 1,674\,9286(10) \cdot 10^{-27}$  кг [17];

энергетический эквивалент массы покоя нейтрона

$$E_{m_n}^0 = m_n c^2 = 939,573\,1(27) \text{ МэВ} [11];$$

заряд  $|q_n| < 10^{-21} |q_e|$ ,  $q_e$  — заряд электрона [18];

схема распада  $n_0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$ ;

период полураспада  $T_{1/2} = 10,13(9) - 10,69(13)$  мин [11];

граничная энергия  $\beta$ -спектра  $E_{\beta p} = 782,43(4)$  кэВ [11];

спин  $S_n = \pm 1/2$  [11];

магнитный момент  $\mu_n = 1,913\,042\,75(45) \mu_N$  [17];

комптоновская длина волны  $\lambda_{c,n} = h/m_{nc} = 1,319\,590\,9(22) \cdot 10^{-15}$  м [17].

Верхняя оценка значения электрического дипольного момента нейтрона  $d_n$ , полученная в экспериментах с ультрахолодными нейтронами, дает отношение  $d_n/e < 6 \cdot 10^{-27}$  [11]. Нейтрон принято считать электрически нейтральной или обладающей очень малым электрическим зарядом (порядка  $10^{-19} q_e$ ) частицей.

Для нейтрона как элементарной частицы характерно проявление волновых свойств, для описания которых с частицей связывается волна с длиной  $\lambda$ , м, определяе-

мой соотношением де Бройля

$$\lambda = h/p = 2,86 \cdot 10^{-11} / \sqrt{E_n},$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $p$  — импульс нейтрона;  $E_n$  — энергия нейтрона, эВ. Соотношение справедливо в случае малой релятивистской поправки (рис. 41.1). Отклонение от прямой линии наблюдается при энергиях выше  $10^8$  эВ и обусловлено релятивистскими эффектами при высоких энергиях. Волновые свойства наиболее отчетливо проявляются при низких энергиях; например, при  $E_n = 0,0253$  эВ значение  $\lambda$  сравнимо с размерами атома (табл. 41.1). Нейтроны таких энергий дифрагируют на кристаллической решетке подобно рентгеновскому излучению [19]

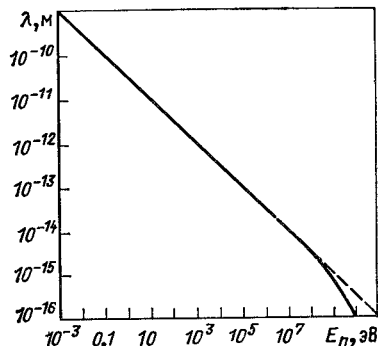


Рис. 41.1. Зависимость длины волны нейтрона от энергии [8]

| Массовое число | $E_n < 1000$ эВ                                        | $1 < E_n < 500$ кэВ                                   | $0,5 < E_n < 20$ МэВ |
|----------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|
| $A < 25$       | Разрешенные резонансы                                  |                                                       |                      |
|                | Потенциальное рассеяние                                |                                                       |                      |
| $25 < A < 80$  | Резонансное рассеяние, реакции (p, p), (n, α), (n, 2n) |                                                       |                      |
|                | Разрешенные резонансы                                  | Перекрывающиеся резонансы                             | Непрерывный спектр   |
|                | Резонансное рассеяние, радиационный захват             |                                                       |                      |
|                | Потенциальное рассеяние                                | Реакции (n, p), (n, α) и (n, 2n), неупругое рассеяние |                      |
| $A > 80$       | Разрешенные резонансы                                  | Перекрывающиеся резонансы                             | Непрерывный спектр   |
|                | Радиационный захват                                    | Неупругое рассеяние, реакции (n, 2n) и (n, 3n)        |                      |

Рис. 41.2. Систематика ядерных реакций с участием нейтронов [9]

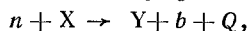
Т а б л и ц а 41.1. Некоторые характеристики нейтронов различных энергий [8]

| Группа                              | Энергия, эВ | Температура, К       | Скорость, м/с     | Длина волны, м        |
|-------------------------------------|-------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| Ультрахолодные ( $< 10^{-7}$ эВ)    | $10^{-7}$   | $1,4 \cdot 10^{-3}$  | 0,44              | $0,9 \cdot 10^{-8}$   |
| Холодные ( $10^{-7} - 10^{-2}$ эВ)  | $10^{-3}$   | 11,6                 | $4,37 \cdot 10^2$ | $9,04 \cdot 10^{-10}$ |
| Тепловые ( $0,01 - 0,1$ эВ)         | 0,0253      | 293                  | 2200              | $1,80 \cdot 10^{-10}$ |
| Резонансные ( $0,1 - 50$ эВ)        | 1,0         | $1,16 \cdot 10^4$    | $1,38 \cdot 10^4$ | $2,86 \cdot 10^{-11}$ |
| Медленные ( $50 - 500$ эВ)          | 100         | $1,16 \cdot 10^6$    | $1,38 \cdot 10^5$ | $2,86 \cdot 10^{-12}$ |
| Промежуточные ( $500 - 10^5$ эВ)    | $10^4$      | $1,16 \cdot 10^8$    | $1,38 \cdot 10^6$ | $2,86 \cdot 10^{-13}$ |
| Быстрые ( $10^5 - 10^7$ эВ)         | $10^6$      | $1,16 \cdot 10^{10}$ | $1,38 \cdot 10^7$ | $2,86 \cdot 10^{-14}$ |
| Больших энергий ( $10^7 - 10^9$ эВ) | $10^8$      | $1,16 \cdot 10^{12}$ | $1,28 \cdot 10^8$ | $2,79 \cdot 10^{-15}$ |
| Релятивистские ( $> 10^9$ эВ)       | $10^{10}$   | $1,16 \cdot 10^{14}$ | $2,99 \cdot 10^8$ | $1,14 \cdot 10^{-16}$ |

Энергией нейтронов определяется вид их взаимодействия с ядрами среды (рис. 41.2). При анализе данных, представленных на рис. 41.2, следует учитывать, что границы энергетических интервалов носят условный характер и перекрываются.

### 41.3. НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ

Для описания ядерных реакций под действием нейтронов используется запись [20]



что соответствует взаимодействию нейтрона с ядром  $X$ , в результате чего образуются ядро  $Y$  и частица  $b$ , которая может быть сложным ядром. Тепловой эффект, или энергия реакции  $Q$ , равна разности масс частиц до и после реакции:

$$Q = E_b + E_Y - E_n,$$

где  $E_Y$  и  $E_b$  — кинетические энергии продуктов реакции.

Если  $Q > 0$ , то реакция называется экзоэнергетической и протекает при любой кинетической энергии нейтрона. Если  $Q < 0$ , то реакция эндоэнергетическая, она не может происходить до тех пор, пока энергия нейтрона не превзойдет значения, называемого пороговой энергией реакции  $E_{\text{пор}}$ :

$$E_{\text{пор}} = \begin{cases} |Q| & \text{в системе центра масс (СЦМ);} \\ |Q| (M + 1)/M & \text{в лабораторной системе координат (ЛСК),} \end{cases}$$

где  $M$  — масса ядра  $X$ , выраженная в нейтронных массах.

Микроскопическое сечение взаимодействия  $\sigma_i$  реакции типа  $i$  рассматривается как число событий данного типа  $i$  в единицу времени, отнесенное к одному ядру вещества и деленное на число частиц, попадающих в единицу времени на поверхность единичной площади. В расчетах часто используется величина

$$\Sigma_i = \rho \sigma_i,$$

где  $\Sigma_i$  — в  $\text{см}^{-1}$ ;  $\rho$  — концентрация ядер в веществе,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $\sigma_i$  — микроскопическое сечение,  $\text{см}^2$ . В литературе по нейтронной физике иногда встречается внесистемная единица сечения барн, которая связана с единицей СИ соотношением  $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$ . Макроскопическое сечение  $\Sigma_i$  рассматривается как вероятность нейтрона испытать акт рассеяния или поглощения на отрезке длиной 1 см.

Полный результат взаимодействия может быть представлен как сумма эффектов упругого рассеяния и неупругих взаимодействий либо как сумма упругого и неупругого эффектов рассеяния и эффекта поглощения нейтронов. Неупругое взаимодействие включает в себя неупругое рассеяние и поглощение нейтронов.

Приведем символическую запись (рис. 41.3):

$$\begin{aligned} \text{полное сечение } \sigma_{\text{tot}} &= \sigma_{n,n} + \sigma_x = \sigma_s + \sigma_{\text{abs}}; \\ \text{сечение рассеяния } \sigma_s &= \sigma_{n,n} + \sigma_n, \\ \text{сечение неупругих взаимодействий } \sigma_x &= \sigma_{n,n'} + \sigma_{\text{abs}}; \\ \text{сечение поглощения } \sigma_{\text{abs}} &= \sigma_{n,f} + \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,3n} + \sigma_{n,np} + \\ &+ \sigma_{n,\gamma} + \sigma_{n,p} + \sigma_{n,\alpha} \dots \end{aligned}$$

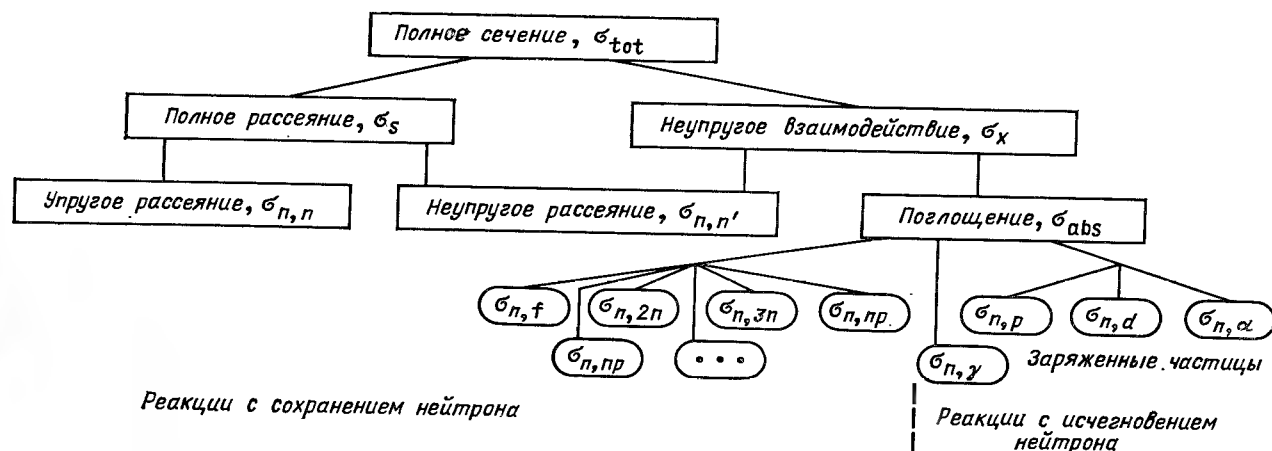


Рис. 41.3. Схема взаимосвязи нейтронных сечений [26]

сечение процессов, приводящих к испусканию нейтронов,  $\sigma_{\text{см}} = \sigma_{n,n'} + 2\sigma_{n,2n} + 3\sigma_{n,3n} + \nu\sigma_{n,t} + \sigma_{n,np} + \dots$ ;

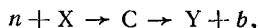
сечение процессов, связанных с образованием нейтронов,  $\sigma_p = \sigma_{n,n} + \sigma_{\text{см}}$ .

Здесь  $\sigma_{n,n}$  и  $\sigma_{n,n'}$  — сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов;  $\sigma_{n,2n}$  и  $\sigma_{n,3n}$  — сечения реакций  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ ;  $\sigma_{n,t}$  — сечение деления;  $\sigma_{n,\gamma}$  — сечение радиационного захвата;  $\sigma_{n,p}$ ,  $\sigma_{n,d}$ ,  $\sigma_{n,\alpha}$ ,  $\sigma_{n,np}, \dots$  — сечения реакций  $(n, p)$ ,  $(n, d)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, np)$ , ... соответственно;  $\nu$  — средний выход нейтронов при делении.

#### 41.4. МЕХАНИЗМ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С УЧАСТИЕМ НЕЙТРОНОВ

Ядерные реакции, происходящие при столкновении нейтронов с ядрами, характеризуются большим разнообразием и зависят от индивидуальных особенностей сталкивающихся частиц и энергии их относительного движения. Всю совокупность ядерных реакций условно можно разделить на две группы: реакции с образованием составного ядра и прямые ядерные реакции. Система, образующаяся из поглощенного нейтрона и ядра мишени и находящаяся в сильно возбужденном состоянии, называется составным ядром. Время жизни составного ядра составляет около  $10^{-17}$  с, а энергия возбуждения равна сумме кинетической энергии и энергии связи поглощенного нейтрона. Энергия возбуждения составного ядра распределяется среди большого числа степеней свободы.

Согласно современным представлениям о ядерных реакциях считается, что процесс протекает в две стадии: образование составного ядра и распад составного ядра на продукты реакции, т. е.



где  $C$  — составное ядро, образующееся в промежуточной стадии. Распад составного ядра зависит от энергии, момента количества движения и четности и не зависит от способа образования составного ядра.

Однако возможен процесс, когда нейтрон, сталкиваясь с отдельным нуклоном ядра-мишени, с большой вероятностью покидает ядро без взаимодействия с другими нуклонами. Такой процесс называется прямой реакцией. В отличие от ядерной реакции с образованием составного ядра, когда возбуждается большое число степеней свободы, в прямой ядерной реакции возбуждается немного степеней свободы. При энергиях налетающих нейтронов меньше 20 МэВ вероятность этого процесса мала.

Реализуются также ядерные реакции, носящие промежуточный характер между прямыми реакциями и реакциями с образованием составного ядра. Ядро может распасться и до того момента, когда энергия, вносимая захваченной частицей, распределяется между всеми нуклонами ядра (предравновесный распад).

Распад составного ядра может происходить несколькими способами: с испусканием нейтрона той же энергии, что и поглощенная (упругое или резонансное рассеяние); с испусканием одного или нескольких  $\gamma$ -квантов (радиационный захват); с испусканием заряженных частиц или нейтронов в случае достаточно больших энергий возбуждения.

Отличительной особенностью ядерных реакций с образованием составного ядра при малых энергиях нейтронов (менее 1 МэВ) является наличие резонансов в энергетической зависимости сечений. Резонансное рассеяние обусловлено внутренней областью ядра, в то

время как потенциальное рассеяние — поверхностью ядра. В этой области энергий наиболее существенны процессы с упругим рассеянием и радиационным захватом нейтронов. Другие процессы либо запрещены энергетически, либо характеризуются малой вероятностью. Неупругое рассеяние невозможно, если энергия падающего нейтрона меньше энергии возбуждения ядра (для ядер со средними массовыми числами энергии возбуждения, как правило, превосходит несколько десятков мегаэлектрон-вольт). Реакции  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  и другие маловероятны из-за наличия кулоновского барьера, который препятствует испусканию заряженных частиц с малой энергией.

При взаимодействии нейтронов тепловых и резонансных энергий с ядрами тяжелых нуклидов наиболее существенны упругое рассеяние и радиационный захват, для некоторых тяжелых нуклидов — деление. Если энергия нейтронов выше 1 МэВ, то возможными становятся другие ядерные реакции, такие как неупругое рассеяние, реакции с испусканием заряженных частиц.

Процесс упругого рассеяния нейтрона представляется состоящим из двух частей; чисто резонансного с образованием составного ядра и потенциального рассеяния, при котором нейтрон не проникает в ядро, а отражается от его поверхности. Резонансное и потенциальное рассеяния когерентны и интерferируют. Согласно формуле Брейта — Вигнера для упругого рассеяния

$$\sigma_s(E) = \pi \lambda^2 \frac{\Gamma_n^2}{(E - E_R)^2 + (\Gamma/2)^2} + 4\pi a^2 + 4\pi \lambda \Gamma_n a \frac{E - E_R}{(E - E_R)^2 + (\Gamma/2)^2},$$

где  $\lambda$  — приведенная длина волны де Бройля ( $\lambda = h/mv$ );  $\Gamma$  и  $\Gamma_n$  — полная и нейтронная ширины резонансов ( $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma$  — ширина уровня, которая складывается из парциальных ширин:  $\Gamma_n$  — нейтронной ширины и  $\Gamma_\gamma$  — радиационной ширины; отношения  $\Gamma_n/\Gamma$  и  $\Gamma_\gamma/\Gamma$  — вероятности упругого рассеяния с образованием составного ядра и радиационного захвата соответственно; ширины резонансов берутся на половине высоты сечения в резонансе и выражаются в энергетических единицах);  $E_R$  — энергия резонанса;  $a$  — эффективный радиус ядра. Первое слагаемое соответствует резонансному рассеянию, второе — потенциальному рассеянию, третье — интерференции процессов потенциального и резонансного рассеяния. Видно, что при  $E_R > E$  интерференционный член в формуле принимает отрицательное значение, что соответствует уменьшению сечения вследствие интерференции [9, 12].

Полное сечение рассеяния нейтрона часто рассматривается в виде суммы когерентного и некогерентного сечений [8]:

$$\sigma_s = \sigma_s \text{ coh} + \sigma_s \text{ noncoh}.$$

#### 41.5. СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В табл. 41.2—41.4 приведены сечения ядерных реакций для нейтронов тепловых энергий (0,0253 эВ), полученные экспериментально или в результате сопоставления данных различных авторов.

В первой колонке указаны символ элемента и массовое число. Если массовое число отсутствует, то сечение проводится для естественной смеси изотопов данного элемента. Во второй колонке в случае долгоживущего

Т а б л и ц а 41.2. Сечения поглощения и рассеяния для нейтронов с энергией 0,0253 эВ  
(элементы с атомными номерами 1—60) [21]

| Символ и<br>массовое<br>число |    | Содержание в<br>естественной<br>смеси, %, или (н)<br>$T_{1/2}$ [22] | Концентрация<br>ядер $\epsilon$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ | $\sigma_n, \gamma, 10^{-28}$ м $^2$                                       | $\sigma_s, 10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ coh,<br>$10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ noncoh,<br>$10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|----|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| H                             | 1  | 99,985                                                              | $5,37 \cdot 10^{-5}$                                   | 0,3326 (7)                                                                | 20,491 (14)                 | 0,439 (3)                            | 20,052 (14)                             |
|                               | 2  | 0,0148                                                              | —                                                      | 0,519 (7) $\cdot 10^{-3}$                                                 | 3,390 (12)                  | 2,484 (5)                            | 0,906 (13)                              |
| He                            | 3  | —                                                                   | $2,68 \cdot 10^{-5}$                                   | —                                                                         | 0,76 (1)                    | —                                    | —                                       |
|                               | 4  | 0,000138<br>99,999862                                               | —                                                      | 0,031 (9) $\cdot 10^{-3}$                                                 | 3,10 (13)                   | 2,48 (4)                             | 0,62 (12)                               |
| Li                            | —  | —                                                                   | 0,0464                                                 | —                                                                         | 0,76 (1)                    | —                                    | —                                       |
|                               | 6  | 7,52                                                                | —                                                      | 0,0448 (30)<br>70,5 (1,9) (abs)<br>0,0385 (30)<br>940 (4) ( $n, \alpha$ ) | 0,95 (4)                    | —                                    | 0,25 (4)                                |
|                               | 7  | 92,48                                                               | —                                                      | 0,0454 (3)                                                                | 0,75 (2)                    | 0,45 (8)                             | 0,30 (8)                                |
| Be                            | 7  | 53,30 сут                                                           | —                                                      | 48 000 (9000) ( $n, p$ )                                                  | 0,97 (4)                    | 0,51 (1)                             | 0,46 (4)                                |
|                               | 9  | 100                                                                 | 0,1236                                                 | 7,6 (8) $\cdot 10^{-3}$                                                   | —                           | —                                    | —                                       |
| B                             | —  | —                                                                   | 0,136                                                  | 0,10 (4)                                                                  | 6,151 (5)                   | —                                    | 0,004 (1)                               |
|                               | 10 | 19,8                                                                | —                                                      | 0,5 (2)                                                                   | 4,27 (7)                    | 3,01 (5)                             | 1,26 (3)                                |
|                               | 11 | 80,2                                                                | —                                                      | 3837 (9) (abs)                                                            | 2,23 (6)                    | 0,1180 (3)                           | 2,11 (8)                                |
| C                             | 12 | —                                                                   | 0,08023                                                | 5,5 (3,3) $\cdot 10^{-3}$                                                 | 4,84 (4)                    | 4,69 (3)                             | 0,15 (3)                                |
|                               | 13 | 98,89                                                               | —                                                      | 3,50 (7) $\cdot 10^{-3}$                                                  | 4,740 (5)                   | —                                    | 0,3 (1) $\cdot 10^{-3}$                 |
|                               | 14 | 1,11<br>5730 лет                                                    | —                                                      | 3,53 (7) $\cdot 10^{-3}$<br>1,37 (4) $\cdot 10^{-3}$<br>< 0,001           | 4,746 (2)                   | —                                    | —                                       |
| N                             | —  | —                                                                   | $5,38 \cdot 10^{-5}$                                   | 74,7 (7,3) $\cdot 10^{-3}$                                                | 4,19 (12)                   | 4,16 (12)                            | 0,029 (10)                              |
|                               | 14 | 99,63                                                               | —                                                      | 1,90 (3) (abs)                                                            | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 15 | 0,366                                                               | —                                                      | 75,0 (7,5) $\cdot 10^{-3}$                                                | 10,03 (8)                   | 9,60 (4)                             | 0,45 (11)                               |
| O                             | 16 | —                                                                   | $5,38 \cdot 10^{-5}$                                   | 0,024 (8) $\cdot 10^{-3}$                                                 | 10,05 (12)                  | —                                    | 0,46 (5)                                |
|                               | 17 | 99,760                                                              | —                                                      | 0,19 (2) $\cdot 10^{-3}$                                                  | 4,59 (5)                    | —                                    | 3,5 $\cdot 10^{-3}$                     |
|                               | 18 | 0,202                                                               | —                                                      | 0,190 (19) $\cdot 10^{-3}$                                                | 3,761 (6)                   | 3,761 (6)                            | —                                       |
|                               | 19 | 100                                                                 | $5,39 \cdot 10^{-5}$                                   | 0,538 (65) $\cdot 10^{-3}$                                                | 3,61 (6)                    | —                                    | 0,007 (2)                               |
| F                             | 19 | —                                                                   | $2,69 \cdot 10^{-5}$                                   | 0,235 (10) (abs)                                                          | —                           | —                                    | —                                       |
| Ne                            | 20 | 90,51                                                               | —                                                      | 0,16 (1) $\cdot 10^{-3}$                                                  | 3,641 (10)                  | 3,641 (10)                           | 0,40 (2) $\cdot 10^{-3}$                |
|                               | 21 | 0,27                                                                | —                                                      | 9,6 (5) $\cdot 10^{-3}$                                                   | 2,415 (10)                  | —                                    | 0,015 (5)                               |
|                               | 22 | 9,22                                                                | —                                                      | 39 (4) $\cdot 10^{-3}$                                                    | 2,47 (3)                    | —                                    | —                                       |
| Na                            | 23 | 100                                                                 | 0,02541                                                | 37 (4) $\cdot 10^{-3}$<br>0,666 (110)<br>< 1,5 ( $n, \alpha$ )            | 5,1 (3)                     | —                                    | —                                       |
|                               | 24 | 78,99                                                               | —                                                      | 45,5 (6,0) $\cdot 10^{-3}$                                                | 1,705 (9)                   | —                                    | —                                       |
| Mg                            | 25 | 10,0                                                                | 0,04310                                                | 0,530 (5)                                                                 | 3,025 (2)                   | 1,54 (2)                             | 1,55 (3)                                |
|                               | 26 | 11,01                                                               | —                                                      | 0,400 (30)                                                                | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 27 | 9,46 мин                                                            | —                                                      | 0,063 (3)                                                                 | 3,4140 (24)                 | —                                    | 0,046 (6)                               |
| Al                            | 27 | 100                                                                 | 0,06024                                                | 0,051 (5)                                                                 | 3,74 (4)                    | —                                    | —                                       |
| Si                            | 28 | 92,23                                                               | 0,04996                                                | 0,190 (30)                                                                | —                           | 1,54 (12)                            | 0,023                                   |
|                               | 29 | 4,67                                                                | —                                                      | 0,0382 (8)                                                                | 2,83 (17)                   | —                                    | —                                       |
|                               | 30 | 3,10                                                                | —                                                      | 0,07 (2)                                                                  | —                           | —                                    | —                                       |
| P                             | —  | —                                                                   | 0,03539                                                | 231 (3) $\cdot 10^{-3}$                                                   | 1,4134 (10)                 | —                                    | 9,8 (6) $\cdot 10^{-3}$                 |
| S                             | —  | —                                                                   | 0,03950                                                | 0,171 (3)                                                                 | 2,0437 (17)                 | —                                    | 0,009 (2)                               |
|                               | 32 | 95,02                                                               | —                                                      | 0,177 (5)                                                                 | 1,992 (6)                   | —                                    | —                                       |
|                               | 33 | 0,75                                                                | —                                                      | 0,101 (14)                                                                | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 34 | 4,21                                                                | —                                                      | 0,107 (2)                                                                 | 2,49 (4)                    | —                                    | —                                       |
| Cl                            | —  | —                                                                   | $5,45 \cdot 10^{-5}$                                   | 0,172 (6)                                                                 | 3,134 (10)                  | —                                    | 0,006 (4)                               |
|                               | 35 | —                                                                   | —                                                      | 0,52 (1)                                                                  | 0,9787 (50)                 | 0,9733 (50)                          | 5,4 (7) $\cdot 10^{-3}$                 |
|                               | 36 | —                                                                   | —                                                      | 8 (4) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, \alpha$ )                                     | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 37 | —                                                                   | —                                                      | 0,53 (4)                                                                  | 0,9432 (21)                 | —                                    | —                                       |
|                               | 38 | —                                                                   | —                                                      | 7 (4) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, \alpha$ )                                     | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 39 | —                                                                   | —                                                      | 0,35 (4)                                                                  | 2,8 (7)                     | 2,7 (2)                              | —                                       |
|                               | 40 | —                                                                   | —                                                      | 2 (1) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, p$ )                                          | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 41 | —                                                                   | —                                                      | 190 (80) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, \alpha$ )                                  | —                           | 1,45 (3)                             | —                                       |
|                               | 42 | —                                                                   | —                                                      | 227 (5) $\cdot 10^{-3}$                                                   | 15,8 (2)                    | —                                    | 4,9 (2)                                 |
|                               | 43 | —                                                                   | —                                                      | 33,1 (3)                                                                  | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 44 | —                                                                   | —                                                      | 0,37 (2) ( $n, p$ )                                                       | —                           | —                                    | —                                       |
|                               | 45 | —                                                                   | —                                                      | 33,5 (3) (abs)                                                            | —                           | —                                    | —                                       |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в<br>естественной<br>смеси, %, или (и)<br>$T_{1/2}$ [22] | Концентрация<br>ядер $\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ | $\sigma_n, \gamma$ , $10^{-28}$ м $^2$                                                      | $\sigma_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_{s\text{coh}}$ ,<br>$10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_{s\text{noncoh}}$ ,<br>$10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 35                            | 75,77                                                               | —                                                  | 43,6 (4)<br>0,489 (14) ( $n, p$ )<br>0,08 (4) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, \alpha$ )               | 20,6 (3)                       | 16,32 (25)                                    | 4,24 (25)                                        |
| 36                            | 3,00 $\cdot 10^5$ лет                                               | —                                                  | < 10,0                                                                                      | —                              | —                                             | —                                                |
| 37                            | 24,23                                                               | —                                                  | 0,433 (6)                                                                                   | 1,15 (5)                       | < 0,08 $\cdot 10^{-3}$                        | —                                                |
| Ag                            | —                                                                   | 2,68 $\cdot 10^{-5}$                               | 0,675 (9)                                                                                   | 0,647 (3)                      | —                                             | 0,209 (2)                                        |
| 36                            | 0,337                                                               | —                                                  | 5,2 (5)                                                                                     | 73,7 (4)                       | —                                             | —                                                |
| 37                            | 35,0 сут                                                            | —                                                  | 5,5 (1) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, \alpha$ )<br>69 (14) ( $n, p$ )<br>1970 (330) ( $n, \alpha$ ) | —                              | —                                             | —                                                |
| 38                            | 0,063                                                               | —                                                  | 0,8 (2)                                                                                     | 1,5 (1,5)                      | —                                             | —                                                |
| 39                            | 269 лет                                                             | —                                                  | 600 (300)                                                                                   | —                              | —                                             | —                                                |
| 40                            | 99,60                                                               | —                                                  | 0,660 (10)                                                                                  | 0,40 (2)                       | —                                             | —                                                |
| K                             | —                                                                   | 0,01325                                            | 2,1 (1)                                                                                     | 2,04 (10)                      | —                                             | 0,37 (10)                                        |
| 39                            | 93,258                                                              | —                                                  | 2,1 (2)                                                                                     | —                              | —                                             | 0,34 (10)                                        |
| 40                            | 0,0117                                                              | —                                                  | 4,3 (5) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, \alpha$ )<br>30 (8)                                           | —                              | —                                             | —                                                |
| 41                            | 1,28 $\cdot 10^9$ лет                                               | —                                                  | 4,4 (3) ( $n, p$ )<br>0,39 (3) ( $n, \alpha$ )<br>1,46 (3)                                  | —                              | —                                             | —                                                |
| Ca                            | 6,730                                                               | —                                                  | 0,43 (2)                                                                                    | —                              | —                                             | 0,7 (2)                                          |
| 40                            | 96,94                                                               | 0,02329                                            | 0,41 (2)                                                                                    | 2,93 (4)                       | —                                             | 0,025 (3)                                        |
| 41                            | —                                                                   | —                                                  | 3,01 (8)                                                                                    | —                              | —                                             | —                                                |
| 41                            | 1,0 $\cdot 10^5$ лет                                                | —                                                  | 2,5 (1,1) $\cdot 10^{-3}$ ( $n, \alpha$ )<br>4,0                                            | —                              | —                                             | —                                                |
| 42                            | 0,647                                                               | —                                                  | 0,680 (70)                                                                                  | 1,2 (2)                        | —                                             | —                                                |
| 43                            | 0,135                                                               | —                                                  | 6,2 (6)                                                                                     | —                              | —                                             | —                                                |
| 44                            | 2,09                                                                | —                                                  | 0,88 (5)                                                                                    | —                              | —                                             | —                                                |
| 45                            | 165 сут                                                             | —                                                  | 15,0                                                                                        | —                              | —                                             | —                                                |
| 46                            | 0,0035                                                              | —                                                  | 0,74 (7)                                                                                    | —                              | —                                             | —                                                |
| 48                            | 0,187                                                               | —                                                  | 1,09 (14)                                                                                   | —                              | —                                             | —                                                |
| Sc                            | 100                                                                 | 0,03349                                            | 27,2 (2)                                                                                    | 22,4 (4)                       | 18,1 (3)                                      | 4,3 (4)                                          |
| Ti                            | —                                                                   | 0,05670                                            | 6,09 (13)                                                                                   | 4,09 (3)                       | 1,34 (2)                                      | 2,75 (4)                                         |
| 46                            | 8,2                                                                 | —                                                  | 0,59 (18)                                                                                   | 2,78 (24)                      | —                                             | —                                                |
| 47                            | 7,4                                                                 | —                                                  | 1,7 (2)                                                                                     | 3,1 (2)                        | 1,3 (2)                                       | 1,8 (3)                                          |
| 48                            | 73,7                                                                | —                                                  | 7,84 (25)                                                                                   | 4,1 (2)                        | —                                             | —                                                |
| 49                            | 5,4                                                                 | —                                                  | 2,2 (3)                                                                                     | 0,7 (3)                        | 0,08 (4)                                      | —                                                |
| 50                            | 5,2                                                                 | —                                                  | 0,179 (3)                                                                                   | 3,7 (3)                        | —                                             | —                                                |
| V                             | —                                                                   | 0,07050                                            | 5,08 (4)                                                                                    | 4,8 (1)                        | 0,017 (1)                                     | —                                                |
| 50                            | 0,25                                                                | —                                                  | 60 (40)                                                                                     | 7,5 (1,0)                      | —                                             | —                                                |
| 51                            | 99,75                                                               | —                                                  | 4,9 (1)                                                                                     | 4,8 (2)                        | —                                             | —                                                |
| Cr                            | —                                                                   | 0,0801                                             | 3,07 (8)                                                                                    | 3,38 (1)                       | 1,63 (1)                                      | 1,75 (1)                                         |
| 50                            | 4,35                                                                | —                                                  | 15,9 (2)                                                                                    | —                              | 2,41 (6)                                      | —                                                |
| 52                            | 83,79                                                               | —                                                  | 0,76 (6)                                                                                    | 2,96 (2)                       | —                                             | —                                                |
| 53                            | 9,50                                                                | —                                                  | 18,2 (1,5)                                                                                  | 7,78 (20)                      | 2,10 (3)                                      | 5,68 (19)                                        |
| 54                            | 2,36                                                                | —                                                  | 0,36 (4)                                                                                    | 2,54 (10)                      | —                                             | —                                                |
| Mn                            | 100                                                                 | 0,08145                                            | 13,3 (2)                                                                                    | 2,2 (2)                        | 1,65 (2)                                      | 0,6 (2)                                          |
| Fe                            | —                                                                   | 0,08487                                            | 2,56 (3)                                                                                    | 11,35 (3)                      | —                                             | 0,38 (3)                                         |
| 54                            | 5,8                                                                 | —                                                  | 2,25 (18)                                                                                   | 2,17 (10)                      | —                                             | —                                                |
| 56                            | 91,72                                                               | —                                                  | 2,59 (14)                                                                                   | 12,46 (49)                     | —                                             | —                                                |
| 57                            | 2,2                                                                 | —                                                  | 2,48 (30)                                                                                   | —                              | —                                             | —                                                |
| 58                            | 0,28                                                                | —                                                  | 1,28 (5)                                                                                    | —                              | —                                             | —                                                |
| Co                            | 100                                                                 | 0,0890                                             | 37,18 (6)                                                                                   | 6,00 (6)                       | 0,96 (3)                                      | 5,04 (8)                                         |
| 60                            | 5,271 года                                                          | —                                                  | 2,0 (2)                                                                                     | —                              | —                                             | —                                                |
| 60m                           | 10,5 мин                                                            | —                                                  | 58,0 (8,0)                                                                                  | —                              | —                                             | —                                                |
| Ni                            | —                                                                   | 0,08980                                            | 4,49 (16)                                                                                   | 17,8 (4)                       | 13,0 (3)                                      | 4,8 (2)                                          |
| 58                            | 68,27                                                               | —                                                  | 4,6 (3)                                                                                     | 25,3 (4)                       | —                                             | —                                                |
| 60                            | 26,10                                                               | —                                                  | 2,9 (2)                                                                                     | 0,98 (7)                       | —                                             | —                                                |
| 61                            | 1,13                                                                | —                                                  | 2,5 (8)                                                                                     | 9,0 (1,0)                      | 7,1 (1)                                       | 1,9 (3)                                          |
| 62                            | 3,59                                                                | —                                                  | 14,5 (3)                                                                                    | 9,1 (4)                        | —                                             | —                                                |
| 64                            | 0,91                                                                | —                                                  | 1,52 (3)                                                                                    | 0,0014 (3)                     | —                                             | —                                                |
| 65                            | 2,52 ч                                                              | —                                                  | 22,4 (2,0)                                                                                  | —                              | —                                             | —                                                |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в<br>естественной<br>смеси, %, или (и)<br>$T_{1/2}$ [22] | Концентрация<br>ядер $\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ | $\sigma_n$ , $\gamma$ , $10^{-28}$ м $^2$        | $\sigma_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ coh,<br>$10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ noncoh,<br>$10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Cu                            | —                                                                   | 0,08493                                            | 3,78 (2)                                         | 7,78 (3)                       | 7,28 (1)                             | 0,50 (4)                                |
| 63                            | 69,20                                                               | —                                                  | 4,50 (2)                                         | 5,1 (2)                        | 5,1 (2)                              | 0,006 (1)                               |
| 64                            | 12,70 ч                                                             | —                                                  | < 6000                                           | —                              | —                                    | —                                       |
| 65                            | 30,80                                                               | —                                                  | 2,17 (3)                                         | 14,1 (5)                       | 13,7 (5)                             | 0,36 (5)                                |
| 66                            | 5,10 мин                                                            | —                                                  | 135 (10)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| Zn                            | —                                                                   | 0,06572                                            | 1,11 (2)                                         | 4,08 (3)                       | 4,00 (3)                             | 0,075 (7)                               |
| 64                            | 48,6                                                                | —                                                  | 0,76 (2)                                         | 3,9 (3)                        | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | $0,015 (1) \cdot 10^{-3} (n, \alpha)$            | —                              | —                                    | —                                       |
| 65                            | 244,1 сут                                                           | —                                                  | 250 (150)                                        | —                              | —                                    | —                                       |
| 66                            | 27,9                                                                | —                                                  | 0,85 (20)                                        | 4,9 (3)                        | —                                    | —                                       |
| 67                            | 4,1                                                                 | —                                                  | 6,8 (8)                                          | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | $0,006 (4) \cdot 10^{-3} (n, \alpha)$            | —                              | —                                    | —                                       |
| 68                            | 18,8                                                                | —                                                  | 0,072 (4) [ $^{69m}\text{Zn}$ ]                  | 5,4 (3)                        | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | 1,0 (1) [ $^{69g}\text{Zn}$ ]                    | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | $< 0,020 \cdot 10^{-3} (n, \alpha)$              | —                              | —                                    | —                                       |
| 70                            | 0,62                                                                | —                                                  | $83,0 (5,0) \cdot 10^{-3}$ [ $^{71g}\text{Zn}$ ] | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | $8,7 (5) \cdot 10^{-3}$ [ $^{71m}\text{Zn}$ ]    | —                              | —                                    | —                                       |
| Ga                            | —                                                                   | 0,05105                                            | 2,90 (10)                                        | 6,50 (20)                      | —                                    | —                                       |
| 69                            | 60,1                                                                | —                                                  | 1,68 (7)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 71                            | 39,9                                                                | —                                                  | 4,71 (23)                                        | —                              | —                                    | —                                       |
| Ge                            | —                                                                   | 0,04530                                            | 2,3 (2)                                          | 8,37 (6)                       | —                                    | —                                       |
| 70                            | 20,5                                                                | —                                                  | 3,43 (20)                                        | 8,8 (8)                        | —                                    | —                                       |
| 72                            | 27,4                                                                | —                                                  | 0,98 (9)                                         | 7,5 (7)                        | —                                    | —                                       |
| 73                            | 7,8                                                                 | —                                                  | 15 (2)                                           | —                              | —                                    | —                                       |
| 74                            | 36,5                                                                | —                                                  | 0,51 (8)                                         | 6,1 (4)                        | —                                    | —                                       |
| 76                            | 7,8                                                                 | —                                                  | 0,15 (2)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| As                            | 100                                                                 | 0,04606                                            | 4,5 (1)                                          | 5,43 (3)                       | 5,37 (2)                             | 0,06 (1)                                |
| Se                            | —                                                                   | 0,0343                                             | 11,7 (2)                                         | 8,56 (1,0)                     | 8,22 (10)                            | 0,34 (10)                               |
| 74                            | 0,87                                                                | —                                                  | 51,8 (1,2)                                       | —                              | —                                    | —                                       |
| 76                            | 9,0                                                                 | —                                                  | 85 (7)                                           | 18,4 (3)                       | —                                    | —                                       |
| 77                            | 7,6                                                                 | —                                                  | 42 (4)                                           | 8,43 (16)                      | —                                    | —                                       |
| 78                            | 23,5                                                                | —                                                  | 0,43 (2)                                         | 8,40 (2)                       | —                                    | —                                       |
| 80                            | 49,6                                                                | —                                                  | 0,61 (45)                                        | 6,95 (6)                       | —                                    | —                                       |
| 82                            | 9,2                                                                 | —                                                  | 0,039 (3)                                        | 5,0 (2)                        | —                                    | —                                       |
|                               | $1,4 \cdot 10^{20}$ лет                                             | —                                                  | [70 с, $^{83m}\text{Se}$ ]                       | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | 0,0052 (4)                                       | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | [22,5 мин, $^{83g}\text{Se}$ ]                   | —                              | —                                    | —                                       |
| Br                            | —                                                                   | 0,02351                                            | 6,9 (2)                                          | 6,1 (2)                        | —                                    | 0,1 (4)                                 |
| 79                            | 50,69                                                               | —                                                  | 11,0 (7)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 81                            | 49,31                                                               | —                                                  | 2,7 (2)                                          | —                              | —                                    | —                                       |
| Kr                            | —                                                                   | $2,67 \cdot 10^{-5}$                               | 25 (1)                                           | 7,50 (13)                      | —                                    | —                                       |
| 78                            | 0,356                                                               | —                                                  | 0,17 (2)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | [50 с, $^{79m}\text{Kr}$ ]                       | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | 6,2 (9) [ $^{79m+g}\text{Kr}$ ]                  | —                              | —                                    | —                                       |
| 80                            | 2,27                                                                | —                                                  | 11,5 (5)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 82                            | 11,6                                                                | —                                                  | 28 (20)                                          | —                              | —                                    | —                                       |
| 83                            | 11,5                                                                | —                                                  | 180 (30)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 84                            | 57,0                                                                | —                                                  | 0,110 (15)                                       | —                              | —                                    | —                                       |
| 85                            | 10,7 года                                                           | —                                                  | 1,66 (2)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 86                            | 17,30                                                               | —                                                  | 0,003 (2)                                        | —                              | —                                    | —                                       |
|                               |                                                                     |                                                    | [76 мин, $^{87g}\text{Kr}$ ]                     | —                              | —                                    | —                                       |
| Rb                            | —                                                                   | 0,01078                                            | 0,38 (4)                                         | 6,4 (2)                        | 6,25 (4)                             | —                                       |
| 85                            | 72,17                                                               | —                                                  | 0,48 (1)                                         | —                              | 6,2 (1)                              | —                                       |
| 87                            | 27,83                                                               | —                                                  | 0,120 (30)                                       | —                              | 6,6 (1)                              | —                                       |
|                               | $4,8 \cdot 10^{10}$ лет                                             | —                                                  | —                                                | —                              | —                                    | —                                       |
| Sr                            | —                                                                   | 0,01746                                            | 1,28 (6)                                         | 10 (1)                         | —                                    | —                                       |
| 84                            | 0,56                                                                | —                                                  | 0,87 (7)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 86                            | 9,80                                                                | —                                                  | 1,04 (7)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 87                            | 7,00                                                                | —                                                  | 16 (3)                                           | —                              | —                                    | —                                       |
| 88                            | 82,60                                                               | —                                                  | 0,058 (4)                                        | —                              | —                                    | —                                       |
| 89                            | 50,5 дня                                                            | —                                                  | 0,42 (4)                                         | —                              | —                                    | —                                       |
| 90                            | 28,8 года                                                           | —                                                  | 0,9 (5)                                          | —                              | —                                    | —                                       |



| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в<br>естественной<br>смеси, %, или (и)<br>$T_{1/2}$ [22] | Концентрация<br>ядер $\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ | $\sigma$<br>$n, \gamma$ , $10^{-28}$ м $^2$  | $\sigma_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ coh,<br>$10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ попох,<br>$10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| Y 89                          | 100                                                                 | 0,03733                                            | 1,28 (2)                                     | 7,67 (6)                       | —                                    | 0,13 (2)                               |
| 90                            | 64,1 ч                                                              | —                                                  | < 6,5                                        | —                              | —                                    | —                                      |
| 91                            | 58,5 сут                                                            | —                                                  | 1,4 (3)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| Zr                            | —                                                                   | 0,03732                                            | 0,185 (3)                                    | 6,40 (4)                       | 6,2 (2)                              | 0,15 (3)                               |
| 90                            | 51,50                                                               | —                                                  | 0,011 (5)                                    | 5,3 (3)                        | —                                    | —                                      |
| 91                            | 11,20                                                               | —                                                  | 1,24 (25)                                    | 10,7 (6)                       | 10,0 (6)                             | 0,7 (1)                                |
| 92                            | 17,10                                                               | —                                                  | 0,220 (60)                                   | —                              | —                                    | —                                      |
| 93                            | $1,5 \cdot 10^6$ лет                                                | —                                                  | $1,3 < \sigma_{n\gamma} < 4,0$               | —                              | —                                    | —                                      |
| 94                            | 17,40                                                               | —                                                  | 0,0499 (24)                                  | 6,1 (4)                        | —                                    | —                                      |
| 96                            | 2,80                                                                | —                                                  | 0,0229 (1)                                   | 6,6 (4)                        | —                                    | —                                      |
| Nb 93                         | 100                                                                 | 0,05445                                            | 1,15 (5)                                     | 0,37 (7)                       | 6,32 (4)                             | $6,20 (6) \cdot 10^{-3}$               |
| 94                            | $2 \cdot 10^4$ лет                                                  | —                                                  | 14,9 (1,0)                                   | —                              | —                                    | —                                      |
|                               |                                                                     |                                                    | [35 сут, $^{95g}\text{Nb}$ ]                 |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | 0,6 (1)                                      |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | [87 ч, $^{95m}\text{Nb}$ ]                   |                                |                                      |                                        |
| 95                            | 35 сут                                                              | —                                                  | < 7,0                                        | —                              | —                                    | —                                      |
|                               |                                                                     |                                                    | [23,4 ч, $^{96}\text{Nb}$ ]                  |                                |                                      |                                        |
| Mo                            | —                                                                   | 0,06403                                            | 2,55 (5)                                     | 5,59 (4)                       | —                                    | 0,27 (12)                              |
| 92                            | 14,80                                                               | —                                                  | 0,019                                        | —                              | —                                    | —                                      |
| 94                            | 9,30                                                                | —                                                  | 0,015                                        | —                              | —                                    | —                                      |
| 95                            | 15,90                                                               | —                                                  | 14,0 (5)                                     | —                              | —                                    | —                                      |
| 96                            | 16,70                                                               | —                                                  | 0,5 (2)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 97                            | 9,60                                                                | —                                                  | 2,1 (5)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 98                            | 24,10                                                               | —                                                  | 0,130 (6)                                    | —                              | —                                    | —                                      |
| 100                           | 9,60                                                                | —                                                  | 0,199 (3)                                    | —                              | —                                    | —                                      |
| Tc 99                         | $2,14 \cdot 10^5$ лет                                               | —                                                  | 20 (1) [15,8 с, $^{100g}\text{Tc}$ ]         | —                              | —                                    | —                                      |
| Ru                            | —                                                                   | 0,07270                                            | 2,56 (13)                                    | 6,5 (1)                        | —                                    | —                                      |
| 96                            | 5,50                                                                | —                                                  | 0,29 (2)                                     | —                              | —                                    | —                                      |
| 98                            | 1,86                                                                | —                                                  | < 8,0                                        | —                              | —                                    | —                                      |
| 99                            | 12,7                                                                | —                                                  | 7,1 (1,0)                                    | —                              | —                                    | —                                      |
| 100                           | 12,6                                                                | —                                                  | 5,0 (6)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 101                           | 17,0                                                                | —                                                  | 3,4 (9)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 102                           | 31,6                                                                | —                                                  | 1,21 (7)                                     | —                              | —                                    | —                                      |
| 104                           | 18,7                                                                | —                                                  | 0,32 (2)                                     | —                              | —                                    | —                                      |
| 105                           | 4,44 ч                                                              | —                                                  | 0,39 (6)                                     | —                              | —                                    | —                                      |
| 106                           | 367 сут                                                             | —                                                  | 0,146 (45)                                   | —                              | —                                    | —                                      |
| Rh 103                        | 100                                                                 | 0,07263                                            | 145 (2) [ $^{104m+g}\text{Rh}$ ]             | —                              | —                                    | —                                      |
| 104                           | 42,3 с                                                              | —                                                  | 40 (30)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 105                           | 35,4 ч                                                              | —                                                  | 11 000 (3000)                                | —                              | —                                    | —                                      |
|                               |                                                                     |                                                    | [29,8 с, $^{106g}\text{Rh}$ ]                |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | 5000 (1000)                                  |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | [130 мин, $^{106m}\text{Rh}$ ]               |                                |                                      |                                        |
| Pd                            | —                                                                   | 0,06906                                            | 6,9 (4)                                      | 4,2 (2)                        | —                                    | 0,091 (9)                              |
| 102                           | 1,00                                                                | —                                                  | 3,4 (3)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 104                           | 11,00                                                               | —                                                  | 0,6 (3)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 105                           | 22,20                                                               | —                                                  | 20 (3)                                       | 5 (6)                          | —                                    | —                                      |
| 106                           | 27,30                                                               | —                                                  | 0,292 (29)                                   | 5,1 (6)                        | —                                    | —                                      |
|                               |                                                                     |                                                    | [ $6,5 \cdot 10^6$ лет, $^{107g}\text{Pd}$ ] |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | 0,013 (2)                                    |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | [213 с, $^{107m}\text{Pd}$ ]                 |                                |                                      |                                        |
| 107                           | $6,5 \cdot 10^6$ лет                                                | —                                                  | 1,8 (2)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
| 108                           | 26,70                                                               | —                                                  | 8,3 (5)                                      | —                              | —                                    | —                                      |
|                               |                                                                     |                                                    | [13,5 ч, $^{108g}\text{Pd}$ ]                |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | 0,183 (33)                                   |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | [4,7 мин, $^{108m}\text{Pd}$ ]               |                                |                                      |                                        |
| 110                           | 11,80                                                               | —                                                  | 0,190 (30)                                   | —                              | —                                    | —                                      |
|                               |                                                                     |                                                    | [23,4 мин, $^{110g}\text{Pd}$ ]              |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | 0,037 (6)                                    |                                |                                      |                                        |
|                               |                                                                     |                                                    | [5,5 ч, $^{111m}\text{Pd}$ ]                 |                                |                                      |                                        |
| Ag                            | —                                                                   | 0,05857                                            | 63,3 (4)                                     | 5,08 (3)                       | —                                    | 0,55 (4)                               |
| 107                           | 51,83                                                               | —                                                  | 37,6 (1,2) [ $^{108m+g}\text{Ag}$ ]          | 7,44 (9)                       | —                                    | 0,12 (3)                               |
| 109                           | 48,17                                                               | —                                                  | 91,0 (1,0) [ $^{110m+g}\text{Ag}$ ]          | 2,55 (6)                       | —                                    | 0,32 (5)                               |
| 110m                          | 249,9 сут                                                           | —                                                  | 82 (11)                                      | —                              | —                                    | —                                      |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в<br>естественной,<br>смеси, %, или (и)<br>$T_{1/2}$ [22] | Концентрация<br>ядер $\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ | $\sigma$ , $\gamma$ , $10^{-28}$ м $^2$   | $\sigma_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ coh, $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ noncoh,<br>$10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| Cd                            | —                                                                    | 0,04635                                            | 2520 (50) <sup>(abs)</sup>                | 5,6 (6)                        | —                                 | —                                       |
| 106                           | 1,25                                                                 | —                                                  | ~ 1                                       | —                              | —                                 | —                                       |
| 108                           | 0,89                                                                 | —                                                  | 1,1 (3)                                   | —                              | —                                 | —                                       |
| 109                           | 464 сут                                                              | —                                                  | 700 (100)                                 | —                              | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,05 ( $n$ , $\alpha$ )                   |                                |                                   |                                         |
| 110                           | 12,50                                                                | —                                                  | 11 (1) [ $^{111m}+g$ Cd]                  | —                              | —                                 | —                                       |
| 111                           | 12,80                                                                | —                                                  | 24 (3)                                    | 5 (1)                          | —                                 | —                                       |
| 112                           | 24,10                                                                | —                                                  | 2,2 (5)                                   | 7 (1)                          | —                                 | —                                       |
| 113g                          | 12,20                                                                | —                                                  | 20 600 (400)                              | —                              | —                                 | —                                       |
|                               | 9·10 <sup>15</sup> лет                                               |                                                    |                                           |                                |                                   |                                         |
| 114                           | 28,70                                                                | —                                                  | 0,30 (2)                                  | 6 (1)                          | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | [53,4 ч, $^{115g}$ Cd]                    |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,036 (7)                                 |                                |                                   |                                         |
| 116                           | 7,50                                                                 | —                                                  | [44,8 сут, $^{115m}$ Cd]                  | —                              | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,050 (8)                                 |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | [2,40 ч, $^{117g}$ Cd]                    |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,025 (10)                                |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | [3,4 ч, $^{117m}$ Cd]                     |                                |                                   |                                         |
| In                            | —                                                                    | 0,03818                                            | 193,8 (1,5)                               | 2,45 (20)                      | 1,95 (10)                         | 0,5 (1)                                 |
| 113                           | 4,3                                                                  | —                                                  | 12,0 (1,1)                                | 3,75 (7)                       | —                                 | 0,000037                                |
| 115                           | 95,7                                                                 | —                                                  | 202 (2)                                   | 2,6 (1)                        | —                                 | 0,6 (1)                                 |
|                               | 5·10 <sup>14</sup> лет                                               |                                                    |                                           |                                |                                   |                                         |
| Sn                            | —                                                                    | 0,03703                                            | 0,626 (9)                                 | 4,909 (6)                      | 4,887 (3)                         | 0,022 (5)                               |
| 112                           | 1,01                                                                 | —                                                  | 0,30 (4)                                  | —                              | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | [21 мин, $^{113m}$ Sn]                    |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,71 (10)                                 |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | [115,1 сут, $^{113g}$ Sn]                 |                                |                                   |                                         |
| 114                           | 0,67                                                                 | —                                                  | 0,115 (30)                                | 4,6 (5)                        | —                                 | —                                       |
| 115                           | 0,38                                                                 | —                                                  | 30 (7)                                    | —                              | —                                 | —                                       |
| 116                           | 14,80                                                                | —                                                  | 0,140 (30)                                | —                              | 4,26 (15)                         | —                                       |
| 117                           | 7,75                                                                 | —                                                  | 2,3 (5)                                   | —                              | 5,2 (4)                           | —                                       |
| 118                           | 24,3                                                                 | —                                                  | 0,220 (50)                                | 4,26 (15)                      | —                                 | —                                       |
| 119                           | 8,6                                                                  | —                                                  | 2,2 (5)                                   | —                              | 4,55 (38)                         | —                                       |
| 120                           | 32,4                                                                 | —                                                  | 0,140 (30)                                | 5,17 (16)                      | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | [27,1 ч, $^{121g}$ Sn]                    |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,001 (1)                                 |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | [55 лет, $^{121m}$ Sn]                    |                                |                                   |                                         |
| 122                           | 4,56                                                                 | —                                                  | 0,180 (20)                                | —                              | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | [40,1 мин, $^{123m}$ Sn]                  |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,001 (1)                                 |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | [129 сут, $^{123g}$ Sn]                   |                                |                                   |                                         |
| 124                           | 5,64                                                                 | —                                                  | 0,130 (5)                                 | 4,41 (30)                      | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | [9,5 мин, $^{125m}$ Sn]                   |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,004 (2)                                 |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | [9,62 сут, $^{125g}$ Sn]                  |                                |                                   |                                         |
| Sb                            | —                                                                    | 0,03076                                            | 5,1 (1)                                   | 4,2 (1)                        | 4,03 (2)                          | 0,17 (12)                               |
| 121                           | 57,3                                                                 | —                                                  | 5,9 (2) [ $^{122m}+g$ Sb]                 | —                              | —                                 | —                                       |
| 123                           | 42,7                                                                 | —                                                  | 4,1 (1) [ $^{124g}$ Sb]                   | —                              | —                                 | —                                       |
| Te                            | —                                                                    | 0,02841                                            | 4,7 (1)                                   | —                              | 3,74 (6)                          | 0,2 (2)                                 |
| 120                           | 0,091                                                                | —                                                  | 2,0 (3) [ $^{121g}$ Te]                   | —                              | —                                 | —                                       |
| 122                           | 2,5                                                                  | —                                                  | 3,4 (5)                                   | —                              | —                                 | —                                       |
| 123                           | 0,89                                                                 | —                                                  | 418 (30)                                  | —                              | —                                 | —                                       |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,046 (6) · 10 $^{-3}$ ( $n$ , $\alpha$ ) |                                |                                   |                                         |
| 124                           | 4,60                                                                 | —                                                  | 6,8 (1,3)                                 | 3,8 (4)                        | —                                 | —                                       |
| 125                           | 7,00                                                                 | —                                                  | 1,55 (16)                                 | —                              | 4 (4)                             | —                                       |
| 126                           | 18,70                                                                | —                                                  | 1,04 (15)                                 | —                              | —                                 | —                                       |
| 128                           | 31,70                                                                | —                                                  | 0,215 (8)                                 | —                              | —                                 | —                                       |
| 130                           | 34,50                                                                | —                                                  | 0,02 (1)                                  | —                              | —                                 | —                                       |
|                               | 2·10 <sup>21</sup> лет                                               |                                                    | [30 ч, $^{131m}$ Te]                      |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | 0,27 (6)                                  |                                |                                   |                                         |
|                               |                                                                      |                                                    | [25 мин, $^{131g}$ Te]                    |                                |                                   |                                         |
| I                             | —                                                                    | 0,02340                                            | 894 (90) [13 сут, $^{126g}$ I]            | —                              | —                                 | —                                       |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в<br>естественной<br>смеси, %, или (н)<br>$T_{1/2}$ [22] | Концентрация<br>ядер $\rho$ , $10^{24} \text{ см}^{-3}$ | $\sigma_n, \gamma$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ | $\sigma_s$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ | $\sigma_s \text{ coh}$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ | $\sigma_s \text{ попох}$ ,<br>$10^{-28} \text{ м}^2$ |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 126                           | 13 дней                                                             | —                                                       | 5960                                        | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 127                           | 100                                                                 | —                                                       | 6,2 (2) [25 мин, $^{128}\text{gI}$ ]        | —                                   | 3,54 (3)                                        | $\sim 0,0$                                           |
| 129                           | $1,6 \cdot 10^7$ лет                                                | —                                                       | 18 (2)                                      | —                                   | —                                               | —                                                    |
|                               |                                                                     |                                                         | [9,2 мин, $^{130m}\text{I}$ ]               |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | 9 (1)                                       |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | [12,36 ч, $^{130}\text{gI}$ ]               |                                     |                                                 |                                                      |
| 130                           | 12,36 ч                                                             | —                                                       | 18 (3) [8,04 сут, $^{131}\text{gI}$ ]       | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 131                           | 8,04 сут                                                            | —                                                       | 80 (50) [2,28 ч, $^{132}\text{gI}$ ]        | —                                   | —                                               | —                                                    |
| Хе                            | —                                                                   | $2,68 \cdot 10^{-5}$                                    | 23,9 (1,2)                                  | 4,30 (2)                            | —                                               | —                                                    |
| 124                           | 0,096                                                               | —                                                       | 165 (20) [ $^{125m+g}\text{Xe}$ ]           | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 125                           | 17 ч                                                                | —                                                       | $< 0,03^{(n, \alpha)}$                      | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 126                           | 0,09                                                                | —                                                       | 3,5 (8) [ $^{127m+g}\text{Xe}$ ]            | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 127                           | 36,41 сут                                                           | —                                                       | $< 0,01^{(n, \alpha)}$                      | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 128                           | 1,92                                                                | —                                                       | $< 8,0$ [ $^{129m+g}\text{Xe}$ ]            | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 129                           | 26,4                                                                | —                                                       | 21 (5)                                      | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 130                           | 4,1                                                                 | —                                                       | $< 26,0$ [ $^{131m+g}\text{Xe}$ ]           | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 131                           | 21,2                                                                | —                                                       | 85 (10)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 132                           | 26,9                                                                | —                                                       | 0,45 (6) [ $^{133m+g}\text{Xe}$ ]           | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 133                           | 5,25 сут                                                            | —                                                       | 190 (90)                                    | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 134                           | 10,4                                                                | —                                                       | 0,265 (20) [ $^{135m+g}\text{Xe}$ ]         | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 135                           | 9,10 ч                                                              | —                                                       | 2,65 (11) $\cdot 10^6$                      | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 136                           | 8,9                                                                 | —                                                       | 0,26 (2)                                    | —                                   | —                                               | —                                                    |
| Сs                            | 100                                                                 | 0,00847                                                 | 29 (1,5) [ $^{134m+g}\text{Cs}$ ]           | —                                   | —                                               | 0,22                                                 |
| 134                           | 2,062 года                                                          | —                                                       | 140 (12)                                    | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 135                           | $3,0 \cdot 10^6$ лет                                                | —                                                       | 8,5 (5) [13,1 сут, $^{136}\text{Cs}$ ]      | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 137                           | 30,17 года                                                          | —                                                       | 0,110 (33) [32,2 мин, $^{138}\text{Cs}$ ]   | —                                   | —                                               | —                                                    |
| Ва                            | —                                                                   | 0,01535                                                 | 1,2 (1)                                     | 3,42 (4)                            | —                                               | —                                                    |
| 130                           | 0,106                                                               | —                                                       | 11,3 (1,0)                                  | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 132                           | 0,101                                                               | —                                                       | 6,5 (8)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
|                               |                                                                     |                                                         | [10,7 года, $^{133}\text{gBa}$ ]            |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | 0,5                                         |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | [38,9 ч, $^{133m}\text{Ba}$ ]               |                                     |                                                 |                                                      |
| 134                           | 2,417                                                               | —                                                       | 2,0 (1,6)                                   | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 135                           | 6,592                                                               | —                                                       | 5,8 (9)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 136                           | 7,854                                                               | —                                                       | 0,4 (4)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 137                           | 11,23                                                               | —                                                       | 5,1 (4)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 138                           | 71,70                                                               | —                                                       | 0,360 (36)                                  | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 139                           | 82,9 мин                                                            | —                                                       | 6,2 (1,6)                                   | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 140                           | 12,79 сут                                                           | —                                                       | 1,6 (3)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| La                            | —                                                                   | 0,02667                                                 | 8,97 (5)                                    | 10,13 (22)                          | 8,64 (10)                                       | 1,49 (20)                                            |
| 138                           | 0,089                                                               | —                                                       | 57,2 (5,7)                                  | —                                   | —                                               | —                                                    |
|                               | $1,1 \cdot 10^{11}$ лет                                             |                                                         |                                             |                                     |                                                 |                                                      |
| 139                           | 99,911                                                              | —                                                       | 8,93 (4)                                    | 10,13 (22)                          | 8,64 (10)                                       | 1,49 (20)                                            |
| 140                           | 40,3 ч                                                              | —                                                       | 2,7 (3)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| Се                            | —                                                                   | 0,02966                                                 | 0,63 (4)                                    | 4,7 (3)                             | —                                               | —                                                    |
| 136                           | 0,19                                                                | —                                                       | 0,95 (25)                                   | —                                   | —                                               | —                                                    |
|                               |                                                                     |                                                         | [34,4 ч, $^{137m}\text{Ce}$ ]               |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | 6,3 (1,5)                                   |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | [9,0 ч, $^{137}\text{gCe}$ ]                |                                     |                                                 |                                                      |
| 138                           | 0,254                                                               | —                                                       | 0,015 (5)                                   | —                                   | —                                               | —                                                    |
|                               |                                                                     |                                                         | [56 с, $^{139m}\text{Ce}$ ]                 |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | 1,1 (3)                                     |                                     |                                                 |                                                      |
|                               |                                                                     |                                                         | [137,2 сут, $^{139}\text{gCe}$ ]            |                                     |                                                 |                                                      |
| 139                           | 137,2 сут                                                           | —                                                       | 500                                         | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 140                           | 88,50                                                               | —                                                       | 0,57 (4)                                    | 2,83 (11)                           | —                                               | —                                                    |
| 141                           | 35,2 сут                                                            | —                                                       | 29 (3)                                      | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 142                           | 11,08                                                               | —                                                       | 0,95 (5)                                    | 3,7 (2)                             | —                                               | —                                                    |
| 143                           | 33,0 ч                                                              | —                                                       | 6,0 (7)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 144                           | 284,9 сут                                                           | —                                                       | 1,0 (1)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |
| Pr                            | 100                                                                 | 0,02769                                                 | 11,5 (3) [ $^{142m+g}\text{Pr}$ ]           | 2,54 (6)                            | —                                               | —                                                    |
| 142                           | 19,2 ч                                                              | —                                                       | 20 (3)                                      | —                                   | —                                               | —                                                    |
| 143                           | 13,58 сут                                                           | —                                                       | 90 (10)                                     | —                                   | —                                               | —                                                    |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в<br>естественной<br>смеси, %, или (и)<br>$T_{1/2}$ [22] | Концентрация<br>ядер $\rho$ , $10^{28} \text{ см}^{-3}$ | $\sigma_{n,\gamma}$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ | $\sigma_s$ , $10^{-28} \text{ см}^2$ | $\sigma_{s \text{ coh}}$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ | $\sigma_{\text{спонсох}}$<br>$10^{-28} \text{ м}^2$ |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Nd                            | —                                                                   | 0,02914                                                 | —                                            | —                                    | —                                                 | —                                                   |
| 142                           | 27,20                                                               | —                                                       | 50,5(2,0)                                    | 16,0 (1,0)                           | —                                                 | 11 (2)                                              |
| 143                           | 12,20                                                               | —                                                       | 18,7(7)                                      | 7,7 (5)                              | —                                                 | —                                                   |
|                               |                                                                     |                                                         | 325 (10)                                     | 80 (2)                               | —                                                 | —                                                   |
| 144                           | 23,80                                                               | —                                                       | 17,4 (1,6) $\cdot 10^{-3}(n, \alpha)$        | —                                    | —                                                 | —                                                   |
| 145                           | $2,1 \cdot 10^{15}$ лет                                             | —                                                       | 3,6 (3)                                      | 1,0 (2)                              | —                                                 | —                                                   |
|                               | 8,30                                                                | —                                                       | 4,2 (2)                                      | —                                    | —                                                 | —                                                   |
| 146                           | 17,20                                                               | —                                                       | $< 0,1 \cdot 10^{-3}(n, \alpha)$             | —                                    | —                                                 | —                                                   |
|                               |                                                                     |                                                         | 1,4 (1)                                      | —                                    | —                                                 | —                                                   |
| 147                           | 11 сут                                                              | —                                                       | [11 сут, $^{147}\text{gNd}$ ]                | —                                    | —                                                 | —                                                   |
| 148                           | 5,76                                                                | —                                                       | 440 (150)                                    | —                                    | —                                                 | —                                                   |
|                               |                                                                     |                                                         | 2,5 (2)                                      | 4,0 (5)                              | —                                                 | —                                                   |
| 150                           | 5,64                                                                | —                                                       | [1,73 ч, $^{149}\text{gNd}$ ]                | —                                    | —                                                 | —                                                   |
|                               |                                                                     |                                                         | 1,2 (2)                                      | 3,5 (5)                              | —                                                 | —                                                   |
|                               |                                                                     |                                                         | [12,4 мин, $^{151}\text{gNd}$ ]              | —                                    | —                                                 | —                                                   |

Таблица 41.3. Сечения поглощения и рассеяния для нейтронов с энергией 0,0253 эВ (элементы с атомными номерами 61—89) [24]

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в ес-<br>тественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22] | Концентрация ядер<br>$\rho$ , $10^{24} \text{ см}^{-3}$ [23] | $\sigma_{n,\gamma}$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ | $\sigma_s$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ | $\sigma_{\text{tot}}$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| Pm                            | —                                                               | —                                                            | —                                            | —                                   | —                                              |
| 147                           | 5,53 года                                                       | —                                                            | 8400 (1680)                                  | —                                   | —                                              |
| 148m                          | 2,6234 года                                                     | —                                                            | 181 (7)                                      | —                                   | —                                              |
| 148                           | 41,3 сут                                                        | —                                                            | 22 000 (2500)                                | —                                   | 205 (7)                                        |
| 149                           | 5,37 сут                                                        | —                                                            | 2000 (1000)                                  | —                                   | —                                              |
| 151                           | 53,1 ч                                                          | —                                                            | 1400 (300)                                   | —                                   | —                                              |
|                               | 28,4 ч                                                          | —                                                            | $< 700$                                      | —                                   | —                                              |
| Sm                            | —                                                               | 0,0311                                                       | —                                            | —                                   | —                                              |
| 144                           | 3,30                                                            | —                                                            | 5800 (100)                                   | —                                   | —                                              |
| 145                           | 340 сут                                                         | —                                                            | 0,7                                          | —                                   | —                                              |
| 147                           | 15,10                                                           | —                                                            | $\sim 110$                                   | —                                   | —                                              |
| 148                           | $1,06 \cdot 10^{11}$ лет                                        | —                                                            | 64 (5)                                       | 11 (7)                              | 75 (6)                                         |
|                               | 11,30                                                           | —                                                            | 2,7(6)                                       | —                                   | —                                              |
| 149                           | $8 \cdot 10^{15}$ лет                                           | —                                                            | —                                            | —                                   | —                                              |
| 150                           | 13,90                                                           | —                                                            | 41 000 (2000)                                | —                                   | —                                              |
| 151                           | 7,4                                                             | —                                                            | 102 (5)                                      | —                                   | —                                              |
| 152                           | 90 лет                                                          | —                                                            | 15 000 (1800)                                | —                                   | 133 (8)                                        |
| 154                           | 26,60                                                           | —                                                            | 206 (6)                                      | —                                   | —                                              |
|                               | 22,60                                                           | —                                                            | 5,5 (1,1)                                    | —                                   | —                                              |
| Eu                            | —                                                               | 0,0207                                                       | —                                            | —                                   | —                                              |
| 151                           | 47,9                                                            | —                                                            | 4600 (100)                                   | 8,0 (1,0)                           | —                                              |
|                               |                                                                 |                                                              | 9200 (100)                                   | —                                   | —                                              |
| 152                           | 13 лет                                                          | —                                                            | $9,0 (2,0) \cdot 10^{-6} (n, \alpha)$        | —                                   | —                                              |
| 153                           | 52,1                                                            | —                                                            | 2300 (1000)                                  | —                                   | —                                              |
| 154                           | 8,5 года                                                        | —                                                            | 390 (30)                                     | 8,0 (2)                             | —                                              |
|                               |                                                                 |                                                              | 1500 (400)                                   | —                                   | —                                              |
| Gd                            | —                                                               | 0,0305                                                       | —                                            | —                                   | —                                              |
| 152                           | 0,2                                                             | —                                                            | 49 000 (1000)                                | —                                   | —                                              |
|                               | $1,1 \cdot 10^{14}$ лет                                         | —                                                            | 1100 (100)                                   | —                                   | —                                              |
|                               |                                                                 |                                                              | $7,0 \cdot 10^{-3} (n, \alpha)$              | —                                   | —                                              |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в ес-<br>тественной смеси, %,<br>или (и) $T_{1/2}$ [22] | Концентрация ядер<br>$\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ [23] | $\sigma_{n,\gamma}$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\tau_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_{tot}$ , $10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 154                           | 2,10                                                               | —                                                       | 85 (12)                                 | —                            | —                                  |
| 155                           | 14,80                                                              | —                                                       | 61 000 (500)                            | 60                           | —                                  |
| 156                           | 20,6                                                               | —                                                       | 1,5 (1,2)                               | —                            | —                                  |
| 157                           | 15,7                                                               | —                                                       | 254 (2) $\cdot 10^3$                    | 1011                         | —                                  |
| 158                           | 24,80                                                              | —                                                       | 2,5 (5)                                 | —                            | —                                  |
| 160                           | 21,80                                                              | —                                                       | 0,77 (2)                                | —                            | —                                  |
| 161                           | 3,7 млн                                                            | —                                                       | 31 000 (12 000)                         | —                            | —                                  |
| Tb 159                        | 100                                                                | 0,0316                                                  | 25,5 (1,1)                              | 20(2)                        | —                                  |
| 160                           | 72,1 сут                                                           | —                                                       | 525 (100)                               | —                            | —                                  |
| Dy                            | —                                                                  | 0,0317                                                  | 930 (20)                                | 100 (10)                     | 1030 (25)                          |
| 156                           | 0,057                                                              | —                                                       | 33 (3)                                  | —                            | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 9 \cdot 10^{-3}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 153                           | 0,10                                                               | —                                                       | 43 (6)                                  | —                            | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 6 \cdot 10^{-3}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 150                           | 2,3                                                                | —                                                       | 61 (6)                                  | —                            | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 0,3 \cdot 10^{-3}$ (n, $\alpha$ )    |                              |                                    |
| 161                           | 19,0                                                               | —                                                       | 585 (30)                                | 22 (1)                       | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 3 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 162                           | 25,5                                                               | —                                                       | 180 (20)                                | 2,5 (8)                      | —                                  |
| 163                           | 24,9                                                               | —                                                       | 130 (10)                                | 9,7 (4)                      | 140 (10)                           |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 2 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 164                           | 28,1                                                               | —                                                       | 2700 (75)                               | 347 (30)                     | —                                  |
| 165                           | 2,33 ч                                                             | —                                                       | 3900 (300)                              | —                            | —                                  |
| Ho 165                        | 100                                                                | 0,0320                                                  | 66,5 (3,3)                              | 9,4 (2)                      | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 2 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| Er                            | —                                                                  | 0,0172                                                  | 162 (8)                                 | 11,0 (8)                     | —                                  |
| 162                           | 0,14                                                               | —                                                       | 19 (2)                                  | 3,8 (2,0)                    | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 11 \cdot 10^{-3}$ (n, $\alpha$ )     |                              |                                    |
| 164                           | 1,56                                                               | —                                                       | 13,2                                    | 12,1 (7)                     | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 1,2 \cdot 10^{-3}$ (n, $\alpha$ )    |                              |                                    |
| 166                           | 33,4                                                               | —                                                       | 35 (3)                                  | 19,1 (1,0)                   | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 7 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 167                           | 22,9                                                               | —                                                       | 670 (30)                                | 7,9 (8)                      | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 7 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 168                           | 27,1                                                               | —                                                       | 1,95 (5)                                | 15,0 (8)                     | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 9 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 170                           | 14,90                                                              | —                                                       | 5,7 (2)                                 | 15,0 (8)                     | —                                  |
| 171                           | 7,52 ч                                                             | —                                                       | 280 (30)                                | —                            | —                                  |
| Tm 169                        | 100                                                                | 0,0331                                                  | 103 (3)                                 | 12 (2)                       | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 1 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 170                           | 128,6 сут                                                          | —                                                       | 92 (4)                                  | —                            | —                                  |
| 171                           | 1,92 года                                                          | —                                                       | 4,5 (2)                                 | —                            | —                                  |
| Yb                            | —                                                                  | 0,0244                                                  | 36,6 (2,0)                              | 25,0 (8)                     | —                                  |
| 168                           | 0,135                                                              | —                                                       | 3470 (100)                              | —                            | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 4 \cdot 10^{-3}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 170                           | 3,1                                                                | —                                                       | 10 (1)                                  | —                            | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 4 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 171                           | 14,4                                                               | —                                                       | 50 (4)                                  | —                            | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 4 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 172                           | 21,9                                                               | —                                                       | 1,3 (8)                                 | —                            | —                                  |
|                               |                                                                    |                                                         | $< 3 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )      |                              |                                    |
| 173                           | 16,2                                                               | —                                                       | 19 (2)                                  | —                            | —                                  |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в ес-<br>тественной смеси, %,<br>или (п) $T_{1/2}$ [22] | Концентрация ядер<br>$\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ [23] | $\sigma_{n,\gamma}$ , $10^{-28}$ м $^2$                                                                                   | $\sigma_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_{tot}$ , $10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 174                           | 31,60                                                              | —                                                       | 65 (5)                                                                                                                    | —                              | —                                  |
| 176                           | 12,7                                                               | —                                                       | $< 2 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )<br>2,4 (2)                                                                             | —                              | —                                  |
| Lu                            | —                                                                  | 0,0335                                                  | 77 (3)                                                                                                                    | 8,0 (2,0)                      | 84,7 (5)                           |
| 175                           | 97,39                                                              | —                                                       | 23,4 (2,0)                                                                                                                | —                              | —                                  |
| 176                           | 2,61<br>$3,6 \cdot 10^{10}$ лет                                    | —                                                       | $< 6 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )<br>2100 (50)<br>$< 2 \cdot 10^{-3}$ (n, $\alpha$ )                                     | —                              | —                                  |
| Hf                            | —                                                                  | 0,0449                                                  | 102 (2)                                                                                                                   | 8 (2)                          | 110 (2)                            |
| 174                           | 0,16<br>$2 \cdot 10^{15}$ лет                                      | —                                                       | 390 (55)                                                                                                                  | —                              | —                                  |
| 176                           | 5,2                                                                | —                                                       | 38 (6)                                                                                                                    | —                              | —                                  |
| 177                           | 18,60                                                              | —                                                       | 365 (20)                                                                                                                  | —                              | —                                  |
| 178                           | 27,1                                                               | —                                                       | 86 (7)                                                                                                                    | —                              | 372 (23)                           |
| 179                           | 13,7                                                               | —                                                       | 45 (5)                                                                                                                    | —                              | 91 (6)                             |
| 180                           | 35,2                                                               | —                                                       | 12,6 (7)                                                                                                                  | —                              | 51 (6)                             |
| Ta                            | 0,0123                                                             | —                                                       | 700 (200)                                                                                                                 | —                              | —                                  |
| 181                           | 99,9877                                                            | 0,0553                                                  | $10,3 (2,5) \cdot 10^{-3}$<br>[15,8 мин, $^{182m}\text{Ta}$ ]<br>21,0 (7)<br>[115 сут, $^{182g}\text{Ta}$ ]<br>8200 (600) | 6,2 (6)                        | 27,2 (2)                           |
| 182                           | 115 сут                                                            | —                                                       | —                                                                                                                         | —                              | —                                  |
| W                             | —                                                                  | 0,0619                                                  | 18,5 (5)                                                                                                                  | —                              | —                                  |
| 180                           | 0,13                                                               | —                                                       | 3,5 [121 сут, $^{181}\text{W}$ ]                                                                                          | —                              | —                                  |
| 182                           | 26,3                                                               | —                                                       | 20,7 (5)                                                                                                                  | —                              | —                                  |
| 183                           | 14,3                                                               | —                                                       | 10,2 (3)                                                                                                                  | —                              | —                                  |
| 184                           | 30,7                                                               | —                                                       | 1,8 (2)                                                                                                                   | —                              | —                                  |
| 186                           | 28,6                                                               | —                                                       | 37,8 (1,5)                                                                                                                | —                              | —                                  |
| 187                           | 23,9 ч                                                             | —                                                       | 64 (10)                                                                                                                   | —                              | —                                  |
| Re                            | —                                                                  | 0,0950                                                  | 88 (4)                                                                                                                    | 11,3 (5)                       | —                                  |
| 185                           | 37,40                                                              | —                                                       | 112 (3)                                                                                                                   | —                              | —                                  |
| 187                           | 62,60                                                              | —                                                       | 74 (4)                                                                                                                    | —                              | —                                  |
| 188                           | $4 \cdot 10^{10}$ лет<br>16,9 ч                                    | —                                                       | $< 2,0$                                                                                                                   | —                              | —                                  |
| Os                            | —                                                                  | 0,0734                                                  | 15,3 (7)                                                                                                                  | —                              | —                                  |
| 184                           | 0,018                                                              | —                                                       | 3000 (150)                                                                                                                | —                              | —                                  |
| 186                           | 1,582                                                              | —                                                       | $< 1 \cdot 10^{-2}$ (n, $\alpha$ )<br>$< 1 \cdot 10^{-4}$ (n, $\alpha$ )                                                  | —                              | —                                  |
| 187                           | $2 \cdot 10^{15}$ лет<br>1,60                                      | —                                                       | 336 (17)                                                                                                                  | —                              | 344 (12)                           |
| 188                           | 13,3                                                               | —                                                       | $< 1 \cdot 10^{-4}$ (n, $\alpha$ )<br>4,3 (1,0)                                                                           | —                              | —                                  |
| 189                           | 16,1                                                               | —                                                       | $< 3 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )<br>23 (4)                                                                              | —                              | —                                  |
| 190                           | 26,4                                                               | —                                                       | $< 1 \cdot 10^{-5}$ (n, $\alpha$ )<br>13,0 (3)                                                                            | —                              | —                                  |
| 192                           | 41,0                                                               | —                                                       | 2,0 (1)                                                                                                                   | —                              | —                                  |
| 193                           | 30,2 ч                                                             | —                                                       | 1540                                                                                                                      | —                              | —                                  |

| Символ и<br>массовое<br>число | Содержание в ес-<br>тественной смеси, %,<br>или (n) $T_{1/2}$ [22] | Концентрация ядер<br>$\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ [23] | $\sigma_{n,\gamma}$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ | $\sigma_{tot}$ , $10^{-28}$ м $^2$ |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Ir                            | —                                                                  | 0,0782                                                  | 426 (4)                                 | 14 (2)                         | 440 (4)                            |
| 191                           | 37,30                                                              | —                                                       | 924 (53)                                | —                              | —                                  |
| 192                           | 74,20 сут                                                          | —                                                       | 1100 (400)                              | —                              | —                                  |
| 193                           | 62,7                                                               | —                                                       | 112,5 (7,5)                             | —                              | —                                  |
| 193m                          | 10,6 сут                                                           | —                                                       | > 0,035                                 | —                              | —                                  |
| Pt                            | —                                                                  | 0,0661                                                  | 10,0 (2)                                | 11,2 (1,0)                     | —                                  |
| 190                           | 0,013                                                              | —                                                       | 150 (150)                               | —                              | —                                  |
|                               | 6,0·10 $^{11}$ лет                                                 | —                                                       | < 8·10 $^{-3}$ (n, $\alpha$ )           | —                              | —                                  |
| 192                           | 0,78                                                               | —                                                       | < 14,0                                  | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | < 2·10 $^{-4}$ (n, $\alpha$ )           | —                              | —                                  |
| 194                           | 32,9                                                               | —                                                       | 1,2 (9)                                 | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | < 5·10 $^{-6}$ (n, $\alpha$ )           | —                              | —                                  |
| 195                           | 33,8                                                               | —                                                       | 27 (2)                                  | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | < 5·10 $^{-6}$ (n, $\alpha$ )           | —                              | —                                  |
| 196                           | 25,3                                                               | —                                                       | 0,74 (8)                                | —                              | —                                  |
| 198                           | 7,2                                                                | —                                                       | 3,7 (2)                                 | —                              | —                                  |
| 199                           | 30,8 мин                                                           | —                                                       | 15 (10)                                 | —                              | —                                  |
| Au                            | 100                                                                | 0,0590                                                  | 98,85 (9)                               | —                              | —                                  |
| 198                           | 2,695 сут                                                          | —                                                       | 25 100 (370)                            | —                              | —                                  |
| 199                           | 3,14 сут                                                           | —                                                       | 30 (15)                                 | —                              | —                                  |
| Hg                            | —                                                                  | 0,0408                                                  | 375 (5)                                 | —                              | —                                  |
| 196                           | 0,15                                                               | —                                                       | 120 (13)                                | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | [23,8 ч, $^{197m}\text{Hg}$ ]           | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | 3080 (200)                              | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | [64,1 ч, $^{197g}\text{Hg}$ ]           | —                              | —                                  |
| 198                           | 10,0                                                               | —                                                       | 1,9                                     | —                              | —                                  |
| 199                           | 16,8                                                               | —                                                       | 2000 (1000)                             | —                              | —                                  |
| 200                           | 23,1                                                               | —                                                       | < 60,0                                  | —                              | —                                  |
| 201                           | 13,2                                                               | —                                                       | < 60,0                                  | —                              | —                                  |
| 202                           | 29,8                                                               | —                                                       | 4,9 (1)                                 | —                              | —                                  |
| 204                           | 6,90                                                               | —                                                       | 0,43 (10)                               | —                              | —                                  |
| Tl                            | —                                                                  | 0,0351                                                  | 3,4 (5)                                 | 9,7 (4)                        | 13,1 (7)                           |
| 203                           | 29,5                                                               | —                                                       | 11,0 (5)                                | —                              | —                                  |
| 204                           | 3,77 года                                                          | —                                                       | 21,6 (2,0)                              | —                              | —                                  |
| 205                           | 70,5                                                               | —                                                       | 0,10 (3)                                | —                              | —                                  |
| Pb                            | —                                                                  | 0,0329                                                  | 0,170 (2)                               | 11,4 (2)                       | 11,6 (2)                           |
| 204                           | 1,42                                                               | —                                                       | 0,661 (70)                              | —                              | —                                  |
| 206                           | 24,1                                                               | —                                                       | 30,5 (8)·10 $^{-3}$                     | —                              | —                                  |
| 207                           | 22,1                                                               | —                                                       | 709 (10)·10 $^{-3}$                     | —                              | —                                  |
| 208                           | 52,30                                                              | —                                                       | 487 (30)·10 $^{-6}$                     | —                              | —                                  |
| 210                           | 22,3 года                                                          | —                                                       | 0,5 (5)                                 | —                              | —                                  |
| Bi                            | 100                                                                | 0,0280                                                  | 33 (4)·10 $^{-3}$                       | —                              | —                                  |
| 210m                          | 3,5·10 $^6$ лет                                                    | —                                                       | 54 (5)·10 $^{-3}$                       | —                              | —                                  |
| Rn                            | 55,6 с                                                             | —                                                       | < 0,2                                   | —                              | —                                  |
| 222                           | 3,8235 сут                                                         | —                                                       | 0,72 (7)                                | —                              | —                                  |
| Ra                            | 11,435 сут                                                         | —                                                       | 130 (20)                                | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | 0,7 (3)(n, f)                           | —                              | —                                  |
| 224                           | 3,64 сут                                                           | —                                                       | 12,0 (5)                                | —                              | —                                  |
| 226                           | 1600 лет                                                           | —                                                       | 11,5 (1,5)                              | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | < 1·10 $^{-4}$ (n, f)                   | —                              | —                                  |
| 228                           | 5,76 года                                                          | —                                                       | 36 (5)                                  | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | < 2,0(n, f)                             | —                              | —                                  |
| Ac                            | 21,773 года                                                        | —                                                       | 515 (35)                                | —                              | —                                  |
|                               |                                                                    | —                                                       | < 2·10 $^{-3}$ (n, f)                   | —                              | —                                  |

Таблица 41.4. Сечения деления и захвата, рассеяния и полные сечения для нейтронов с энергией 0,0253 эВ и элементов с атомными номерами 90—100

| Символ и массовое число | Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22] | Концентрация ядер $\rho$ , $10^{24}$ см $^{-3}$ [23] | $\sigma_{n,\gamma}$ , $10^{-28}$ м $^2$ [25]  | $\sigma_s$ , $10^{-28}$ м $^2$ [24] | $\sigma_f$ , $10^{-28}$ м $^2$ [25] | $\sigma_{tot}$ , $10^{-28}$ м $^2$ [24] |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| Th 227                  | 18,718 сут                                                 | —                                                    | —                                             | —                                   | 200 (20)                            | —                                       |
| 228                     | 1,1931 года                                                | —                                                    | 123 (15)                                      | —                                   | <0,3                                | —                                       |
| 229                     | 7340 лет                                                   | —                                                    | 54 (6)                                        | —                                   | 30,5 (3,0)                          | 84,5 (6,7)                              |
| 230                     | $8,0 \cdot 10^4$ лет                                       | —                                                    | 23,2 (6)                                      | 13 (4) [26]                         | < $1,2 \cdot 10^{-3}$               | —                                       |
| 232                     | 100                                                        | 0,0299                                               | 7,40 (8)                                      | 12,67 (8)                           | $39 (4) \cdot 10^{-6}$              | 20,07 (11)                              |
|                         | $1,41 \cdot 10^{10}$ лет                                   | —                                                    | —                                             | —                                   | —                                   | —                                       |
| 233                     | 22,3 мин                                                   | —                                                    | 1500 (100)                                    | —                                   | 15 (2)                              | —                                       |
| 234                     | 24,10 сут                                                  | —                                                    | 1,8 (5) [24]                                  | —                                   | <0,01 [24]                          | —                                       |
| Pa 230                  | 17,7 сут                                                   | —                                                    | —                                             | —                                   | 1500 (250) [24]                     | —                                       |
| 231                     | $3,28 \cdot 10^4$ лет                                      | 0,0402                                               | 201 (20)                                      | —                                   | 0,012 (6)                           | 211 (4)                                 |
| 232                     | 1,31 сут                                                   | —                                                    | 760 (100)                                     | —                                   | 700 (100)                           | —                                       |
| 233                     | 27,0 сут                                                   | —                                                    | 21 (6)                                        | —                                   | <0,1                                | 55 (3)                                  |
|                         | —                                                          | —                                                    | [1,17 мин, $^{234m}\text{Pa}$ ]               | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | 20 (3)                                        | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [6,67 ч, $^{234g}\text{Pa}$ ]                 | —                                   | —                                   | —                                       |
| $^{234m}\text{Th}$      | 1,175 мин                                                  | —                                                    | —                                             | —                                   | <500                                | —                                       |
| 234                     | 6,75 ч                                                     | —                                                    | —                                             | —                                   | <5000                               | —                                       |
| U 230                   | 20,8 сут                                                   | —                                                    | —                                             | —                                   | 25 (10)                             | —                                       |
| 231                     | 4,2 сут                                                    | —                                                    | —                                             | —                                   | 400 (300)                           | —                                       |
| 232                     | 72 года                                                    | —                                                    | 73,1 (1,5)                                    | 14,7                                | 75,2 (4,7)                          | 163 (10)                                |
| 233                     | $1,592 \cdot 10^5$ лет                                     | 0,0484                                               | 45,5 (7) [27]                                 | 8,2 (2,0)                           | 529,1 (1,2) [27]                    | 574,7 (1,0) [27]                        |
| 234                     | 0,0054                                                     | —                                                    | 100,0 (1,5)                                   | 12 (4)                              | <0,65                               | 112 (4)                                 |
|                         | $2,45 \cdot 10^5$ лет                                      | —                                                    | —                                             | —                                   | —                                   | —                                       |
| 235                     | 0,720                                                      | 0,0479                                               | 98,3 (8) [27]                                 | 14,0 (5) [27]                       | 582,6 (1,1) [27]                    | 694,9 (1,1) [27]                        |
|                         | $7,038 \cdot 10^8$ лет                                     | —                                                    | —                                             | —                                   | —                                   | —                                       |
| 236                     | $2,342 \cdot 10^7$ лет                                     | —                                                    | 5,2 (3)                                       | —                                   | —                                   | —                                       |
| 237                     | 6,75 сут                                                   | —                                                    | 380 (100)                                     | —                                   | <0,35                               | 411 (138) (abs)                         |
| 238                     | 99,275                                                     | 0,0473                                               | 2,71 (2)                                      | 8,90 (16)                           | $5,3 \cdot 10^{-6}$                 | 11,60 (16)                              |
|                         | $4,468 \cdot 10^9$ лет                                     | —                                                    | —                                             | —                                   | —                                   | —                                       |
| 239                     | 23,5 мин                                                   | —                                                    | 22 (5)                                        | —                                   | 14 (3)                              | —                                       |
| Np 234                  | 4,4 сут                                                    | —                                                    | —                                             | —                                   | 900 (300) [24]                      | —                                       |
| 235                     | 396 сут                                                    | —                                                    | 1600 (200) [24]                               | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [22,5 ч, $^{236m}\text{Np}$ ]                 | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | 184 (4) [24]                                  | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [ $1,29 \cdot 10^6$ лет, $^{236g}\text{Np}$ ] | —                                   | —                                   | —                                       |
| 236                     | $1,29 \cdot 10^6$ лет                                      | —                                                    | —                                             | —                                   | 2500 (150)                          | —                                       |
| 237                     | $2,14 \cdot 10^6$ лет                                      | —                                                    | 169 (3)                                       | —                                   | 0,019 (3)                           | —                                       |
| 238                     | 2,117 сут                                                  | —                                                    | —                                             | —                                   | 2070 (30)                           | —                                       |
| 239                     | 2,35 сут                                                   | —                                                    | 31 (6)                                        | —                                   | <1,0                                | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [7,5 мин, $^{240m}\text{Np}$ ]                | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | 14 (14)                                       | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [65 мин, $^{240g}\text{Np}$ ]                 | —                                   | —                                   | —                                       |
| Pu 236                  | 2,85 года                                                  | —                                                    | —                                             | —                                   | 162 (30)                            | —                                       |
| 237                     | 45,4 сут                                                   | —                                                    | —                                             | —                                   | 2200 (400)                          | —                                       |
| 238                     | 87,74 года                                                 | —                                                    | 547 (20)                                      | 564 (20)                            | 16,5 (5)                            | 588 (20)                                |
| 239                     | $2,410 \cdot 10^4$ лет                                     | —                                                    | 269,3 (2,2) [27]                              | 7,7 (5)                             | 741,7 (2,0) [27]                    | 1017,3 (2,9) [27]                       |
| 240                     | 6570 лет                                                   | —                                                    | 287,0 (1,4)                                   | 1,54 (9)                            | 0,05 (5)                            | 291,1 (1,4)                             |
| 241                     | 14,4 года                                                  | —                                                    | 358,2 (5,1) [27]                              | 11 (1)                              | 1011,1 (6,2) [27]                   | 1369,4 (7,7) [27]                       |
| 242                     | $3,76 \cdot 10^5$ лет                                      | 0,0492                                               | 18,5 (4)                                      | 8,0 (2)                             | <0,2                                | 26,5 (5)                                |
| 243                     | 4,956 ч                                                    | —                                                    | 87 (13)                                       | —                                   | 180 (30)                            | —                                       |
| 244                     | $8,1 \cdot 10^7$ лет                                       | —                                                    | 1,7 (1) [24]                                  | —                                   | —                                   | —                                       |
| 245                     | 10,5 ч                                                     | —                                                    | 150 (30) [24]                                 | —                                   | —                                   | —                                       |
| Am 241                  | 433 года                                                   | —                                                    | $0,10 (5) \cdot 10^{-3}$ [22]                 | —                                   | 3,14 (10)                           | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [13 с, $^{242m}\text{Am}$ ]                   | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | 83,6 (2,6)                                    | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [152 года, $^{242m1}\text{Am}$ ]              | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | 752 (20)                                      | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | [16,01 года, $^{242g}\text{Am}$ ]             | —                                   | —                                   | —                                       |
|                         | —                                                          | —                                                    | 835,6 (20)                                    | —                                   | —                                   | —                                       |
| $^{242m}\text{Am}$      | 152 года                                                   | —                                                    | 1100 (1100)                                   | —                                   | 6900 (400)                          | 8000 (800) (abs)                        |



| Символ и массовое число | Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22] | Концентрация ядер $\rho$ , $10^{24} \text{ см}^{-3}$ [23] | $\sigma_{n,\gamma}$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ [25]                                                      | $\sigma_s$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ [24] | $\sigma_f$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ [25] | $\sigma_{\text{tot}}$ , $10^{-28} \text{ м}^2$ [24] |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 243                     | 7370 лет                                                   | —                                                         | 79,0 (4,0)<br>75,2 (1,8)<br>[26 мин., $^{244m}\text{Am}$ ]<br>4,1 (2)<br>[10,1 ч, $^{244g}\text{Am}$ ] | —                                        | 0,20 (11)                                | 85 (4)                                              |
| $^{244m}\text{Am}$      | 26 мин                                                     | —                                                         | —                                                                                                      | —                                        | 1600 (300)                               | —                                                   |
| 244                     | 10,1 ч                                                     | —                                                         | —                                                                                                      | —                                        | 2300 (300)                               | —                                                   |
| Cm                      | 162,8                                                      | —                                                         | 20 (10)                                                                                                | —                                        | <5,0                                     | —                                                   |
| 243                     | 28,5 года                                                  | —                                                         | 131 (10)                                                                                               | —                                        | 609 (25)                                 | 825 (125) <sup>(abs)</sup>                          |
| 244                     | 18,11 года                                                 | —                                                         | 13,5 (2,0)                                                                                             | 8 (3)                                    | 1,0 (2)                                  | 23 (3)                                              |
| 245                     | $8,5 \cdot 10^3$ лет                                       | —                                                         | 350 (30)                                                                                               | —                                        | 2030 (60)                                | 2375 (100)                                          |
| 246                     | $4,70 \cdot 10^3$ лет                                      | —                                                         | 1,3 (3)                                                                                                | —                                        | 0,15 (7)                                 | —                                                   |
| 247                     | $1,60 \cdot 10^7$ лет                                      | —                                                         | 59,6                                                                                                   | —                                        | 80 (7)                                   | —                                                   |
| 248                     | $3,5 \cdot 10^5$ лет                                       | —                                                         | 2,9 (3)                                                                                                | —                                        | 0,37 (7)                                 | —                                                   |
| 249                     | 65 мин                                                     | —                                                         | 1,6 (8) [24]                                                                                           | —                                        | —                                        | —                                                   |
| Bk                      | 321,4 сут                                                  | —                                                         | 1800 (100)                                                                                             | —                                        | —                                        | 1300 (300) <sup>(abs)</sup>                         |
| 250                     | 3,22 ч                                                     | —                                                         | —                                                                                                      | —                                        | 960 (150)                                | —                                                   |
| Cf                      | 351,0 ч                                                    | —                                                         | 450 (30)                                                                                               | —                                        | 1660 (50)                                | —                                                   |
| 250                     | 13,1 года                                                  | —                                                         | 1750 (250)                                                                                             | —                                        | <350,0                                   | —                                                   |
| 251                     | 900 лет                                                    | —                                                         | 2850 (290)                                                                                             | —                                        | 4800 (480)                               | 7150 (350) <sup>(abs)</sup>                         |
| 252                     | 2,64 года                                                  | —                                                         | 20,4 (1,5)                                                                                             | —                                        | 32 (4)                                   | —                                                   |
| 253                     | 17,8 сут                                                   | —                                                         | 12,0 (2,0)                                                                                             | —                                        | 1100 (220)                               | —                                                   |
| Es                      | 20,47 сут                                                  | —                                                         | 155 (20)<br>[39,3 ч, $^{254m}\text{Es}$ ]<br><3,0<br>[276 сут., $^{254g}\text{Es}$ ]                   | —                                        | —                                        | —                                                   |
| $^{254m}\text{Es}$      | 39,3 ч                                                     | —                                                         | 1,3 [39,3 ч, $^{254m}\text{Es}$ ]                                                                      | —                                        | 1840 (80)                                | —                                                   |
| 254                     | 276 сут                                                    | —                                                         | 40,0<br>[38,3 сут., $^{255}\text{Es}$ ]                                                                | —                                        | 2900 (110)                               | —                                                   |
| 255                     | 38,3 сут                                                   | —                                                         | 43 (10)                                                                                                | —                                        | 3400 (170) [28]                          | —                                                   |
| Fm                      | 3,24 ч                                                     | —                                                         | 76 (76)                                                                                                | —                                        | —                                        | —                                                   |
| 255                     | 20,1 ч                                                     | —                                                         | 26 (3)                                                                                                 | —                                        | —                                        | —                                                   |
| 256                     | 2,63 ч                                                     | —                                                         | 45 (45)                                                                                                | —                                        | —                                        | —                                                   |
| 257                     | 100,5 сут                                                  | —                                                         | —                                                                                                      | —                                        | 2950 (160) [24]                          | 6100 (600) <sup>(abs)</sup>                         |

ядра-мишени указано его содержание в естественной смеси, в случае радиоактивного — период полураспада. Для некоторых нуклидов указаны обе величины. В третьей колонке приведены концентрации ядер. В четвертой колонке приведены сечения ядерных реакций  $\sigma_{n,\gamma}$ ,  $\sigma_{n,\alpha}$ ,  $\sigma_{n,p}$  и  $\sigma_{\text{abs}}$ . Сечения ядерных реакций  $\sigma_{n,\alpha}$ ,  $\sigma_{n,p}$  и  $\sigma_{\text{abs}}$  отличаются от значений  $\sigma_{n,\gamma}$ , приводимых в этой колонке, тем, что сопровождаются описанием типа ядерной реакции. Например, запись 70,5(1,9)<sup>(abs)</sup> или 940(4)<sup>(n, \alpha)</sup> относится к сечениям ядерных реакций  $\sigma_{\text{abs}}$  и  $\sigma_{n,\alpha}$  соответственно. В некоторых случаях даны сечения образования изомерного состояния, для которого дополнительно в квадратных скобках приводится период полураспада или (и) идентификация состояния:  $m$  — ядро в метастабильном состоянии,  $g$  — ядро в основном состоянии. В пятой—седьмой колонках даны сечения рассеяния и его составные части  $\sigma_{\text{scat}}$  и  $\sigma_s$  по сох.

В табл. 41.3 и 41.4 в последней колонке приведены полное сечение взаимодействия и сечение деления соответственно.

#### 41.6. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛНЫХ СЕЧЕНИЙ ОТ ЭНЕРГИИ

На рис. 41.4—41.32 представлены энергетические зависимости полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами  $^1_0\text{H}$ ,  $^2_1\text{H}$ ,  $^3_1\text{H}$ ,  $^4_2\text{He}$ ,  $^6_2\text{C}$ ,  $^9_4\text{Be}$ ,  $^{26}_{26}\text{Fe}$ ,  $^{48}_{26}\text{Cr}$ ,  $^{79}_{29}\text{Cu}$ ,  $^{92}_{42}\text{U}$  с водородом в легкой воде и дейтерием в тяжелой воде [29]. Сплошная кривая на графиках соответствует непрерывной зависимости сечений и получена в результате оценки и обработки всей совокупности экспериментальных результатов, имеющихся на момент оценки, и данных, полученных из расчета по теоретическим моделям в тех энергетических областях, где экспериментальных данных нет. Приводимые на рисунках некоторые экспериментальные значения сечений служат лишь для иллюстрации степени отклонения от оцененных значений. Полный перечень экспериментальных данных представлен в [29]. На рис. 41.19 для железа в энергетической области от 0,1 до 3 МэВ дано качественное описание хода сечения ввиду наличия сложной резонансной структуры.

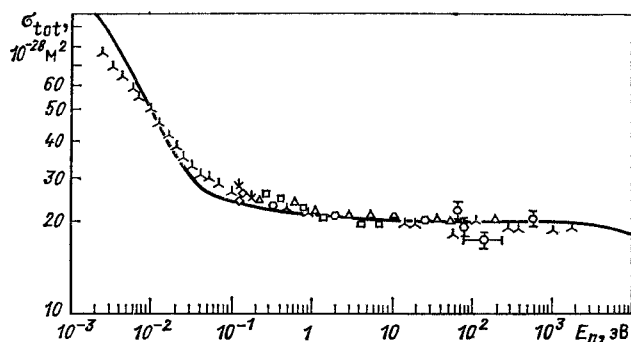


Рис. 41.4. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода от энергии нейтронов ( $10^{-3} < E_n < 10^4$  эВ) [29]

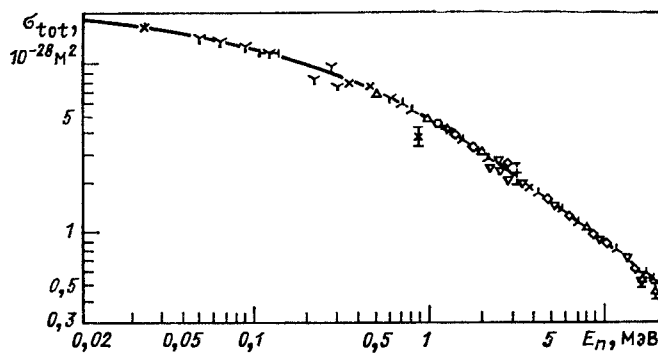


Рис. 41.5. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода от энергии нейтронов ( $2 \cdot 10^{-2} < E_n < 20$  МэВ) [29]

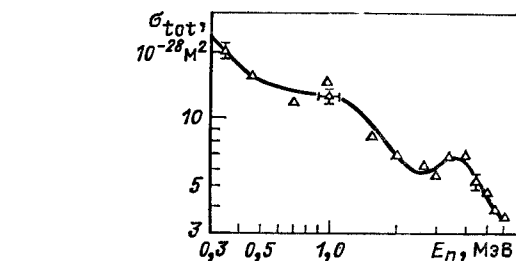
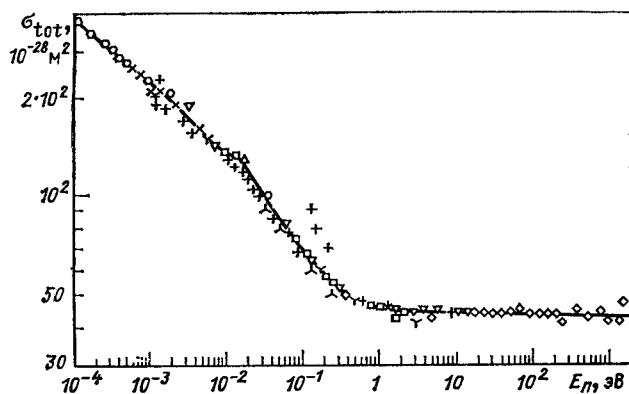


Рис. 41.7. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода в воде от энергии нейтронов ( $0,3 < E_n < 7$  МэВ) [29]

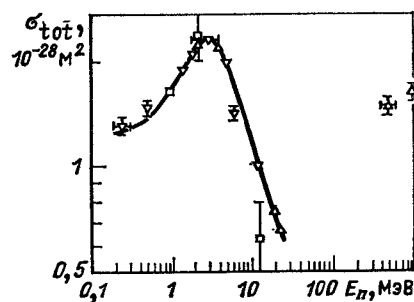


Рис. 41.8. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами трития от энергии нейтронов ( $0,2 < E_n < 12$  МэВ) [29]

Рис. 41.6. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода в воде от энергии нейтронов ( $10^{-4} < E_n < 2 \cdot 10^3$  эВ) [29]

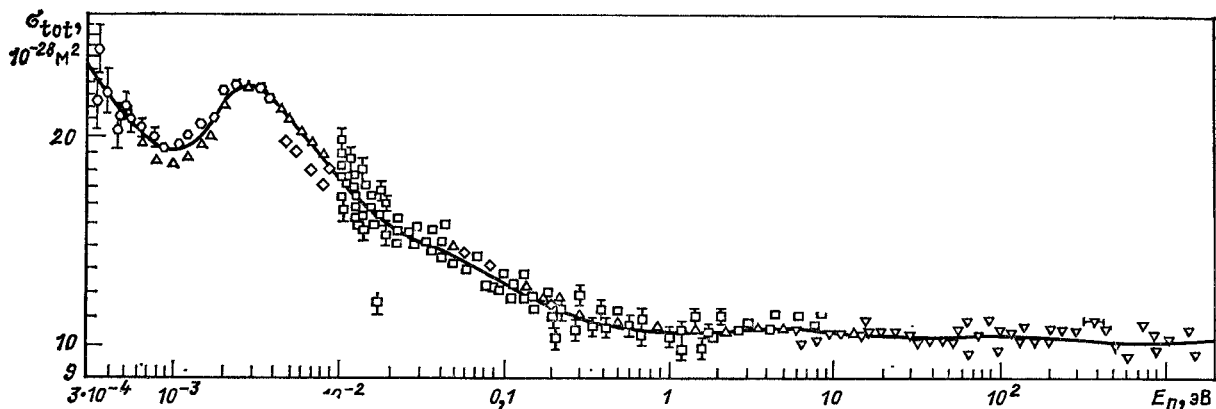


Рис. 41.9. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами дейтерия в тяжелой воде от энергии нейтронов ( $3 \cdot 10^{-4} < E_n < 2 \cdot 10^8$  эВ) [29]

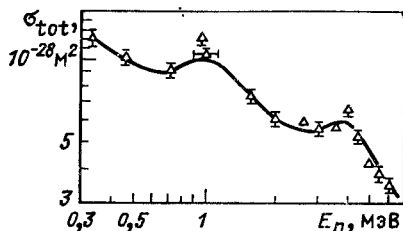


Рис. 41.10. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами дейтерия в тяжелой воде от энергии нейтронов ( $0,3 < E_n < 7$  МэВ) [29]

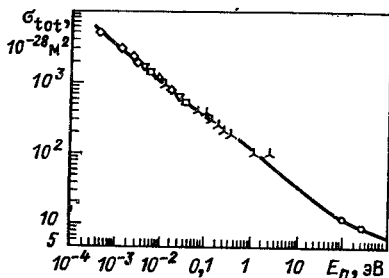


Рис. 41.11. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бора от энергии нейтронов ( $4 \cdot 10^{-4} < E_n < 10^3$  эВ) [29]

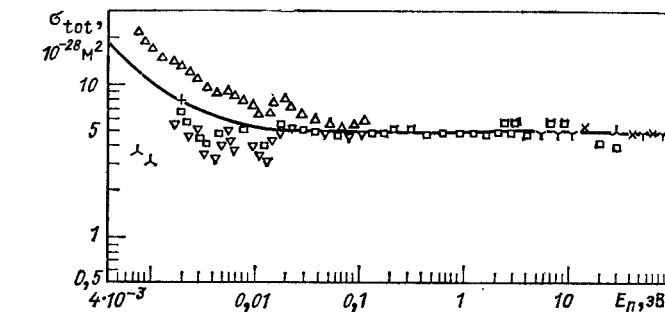
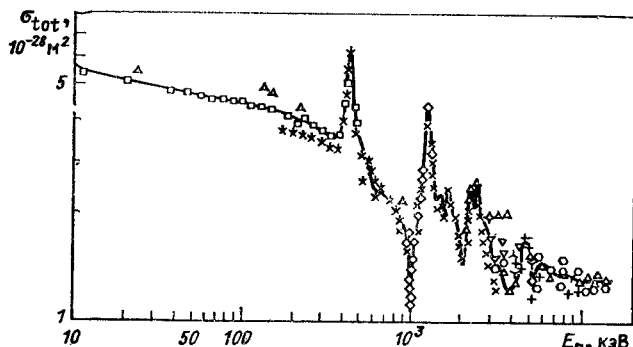


Рис. 41.13. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов ( $4 \cdot 10^{-3} < E_n < 100$  эВ) [29]

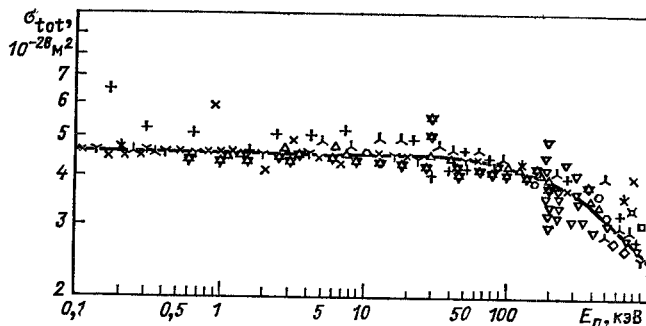


Рис. 41.14. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов ( $0,1$  кэВ  $< E_n < 1$  МэВ) [29]

Рис. 41.12. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бора от энергии нейтронов ( $10 < E_n < 2 \cdot 10^4$  кэВ) [29]

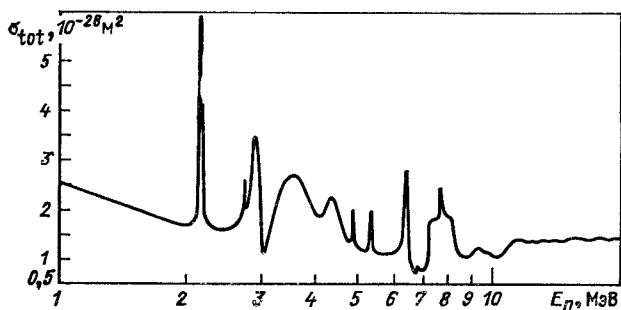


Рис. 41.15. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов ( $1 < E_n < 20$  МэВ) [29]

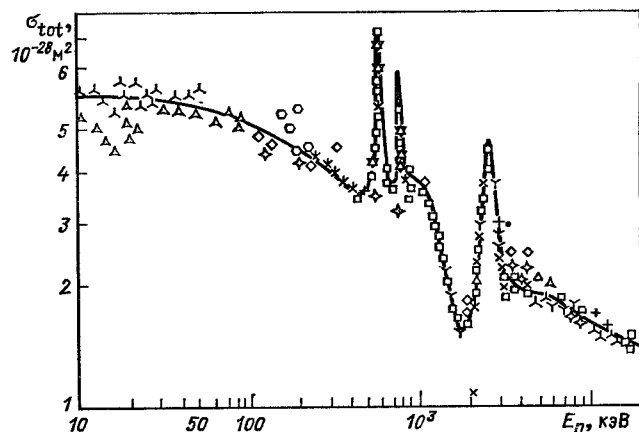


Рис. 41.17. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бериллия от энергии нейтронов ( $10 \text{ кэВ} < E_n < 30 \text{ МэВ}$ ) [29]

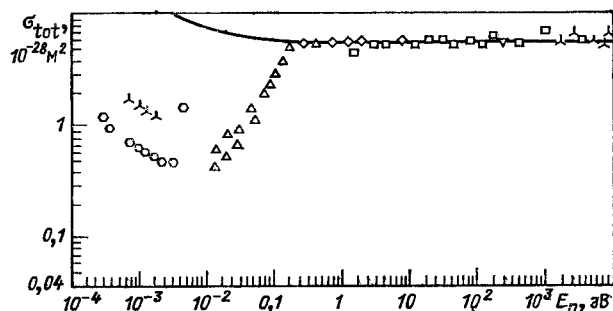


Рис. 41.16. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бериллия от энергии нейтронов ( $10^{-3} < E_n < 10^4$  эВ) [29]

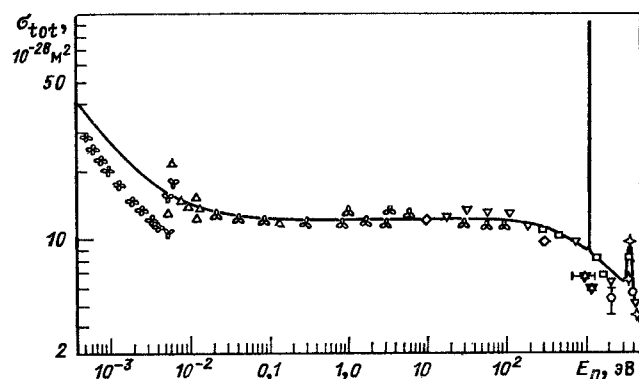


Рис. 41.18. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов ( $10^{-3} < E_n < 5 \cdot 10^3$  эВ) [29]

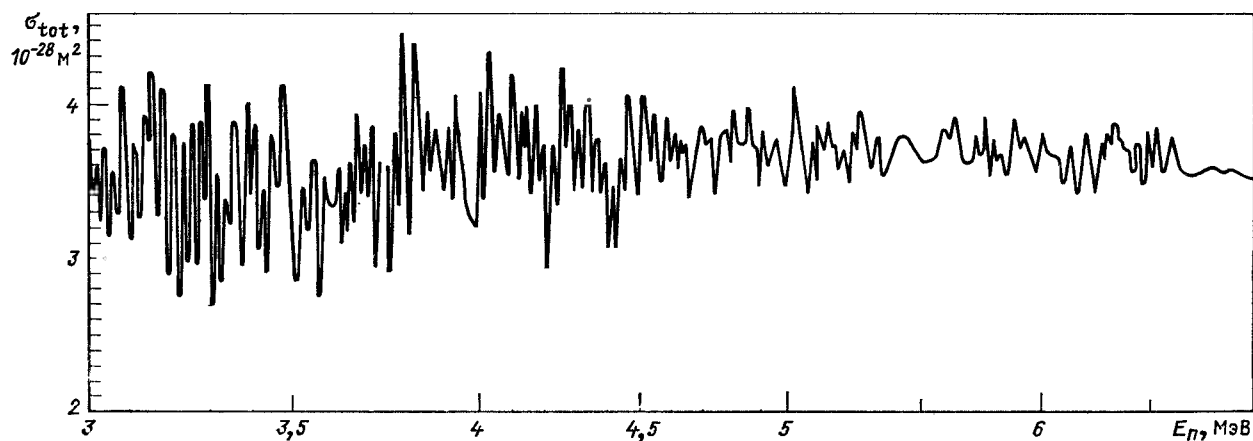


Рис. 41.19. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов ( $3 < E_n < 7$  МэВ) [29]

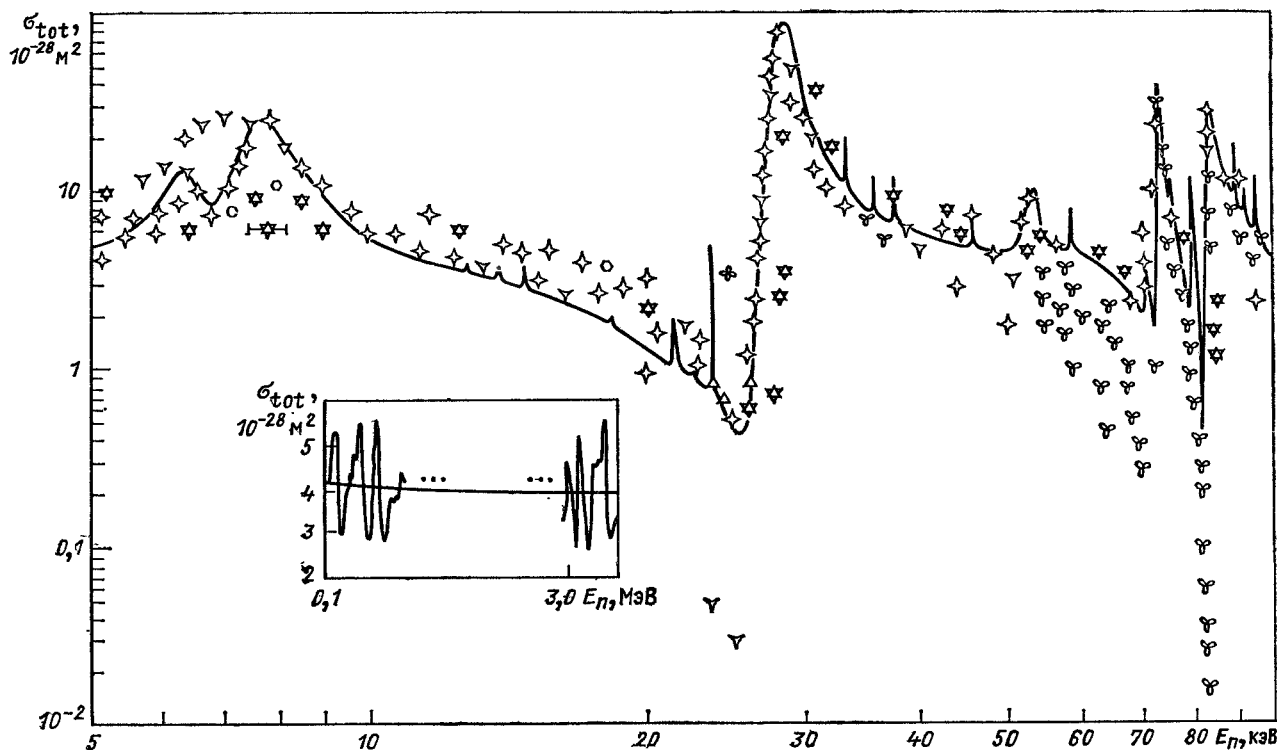


Рис. 41.20. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов ( $5 \text{ кэВ} < E_n < 3 \text{ МэВ}$ ) [29]

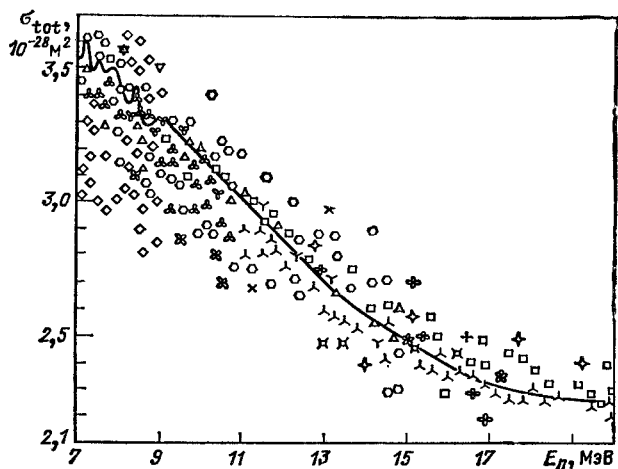


Рис. 41.21. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов ( $7 < E_n < 20 \text{ МэВ}$ ) [29]

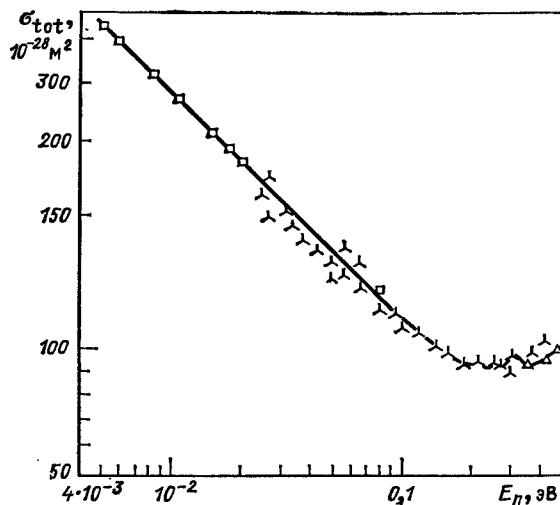


Рис. 41.22. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов ( $5 \cdot 10^{-3} < E_n < 0.5 \text{ эВ}$ ) [29]

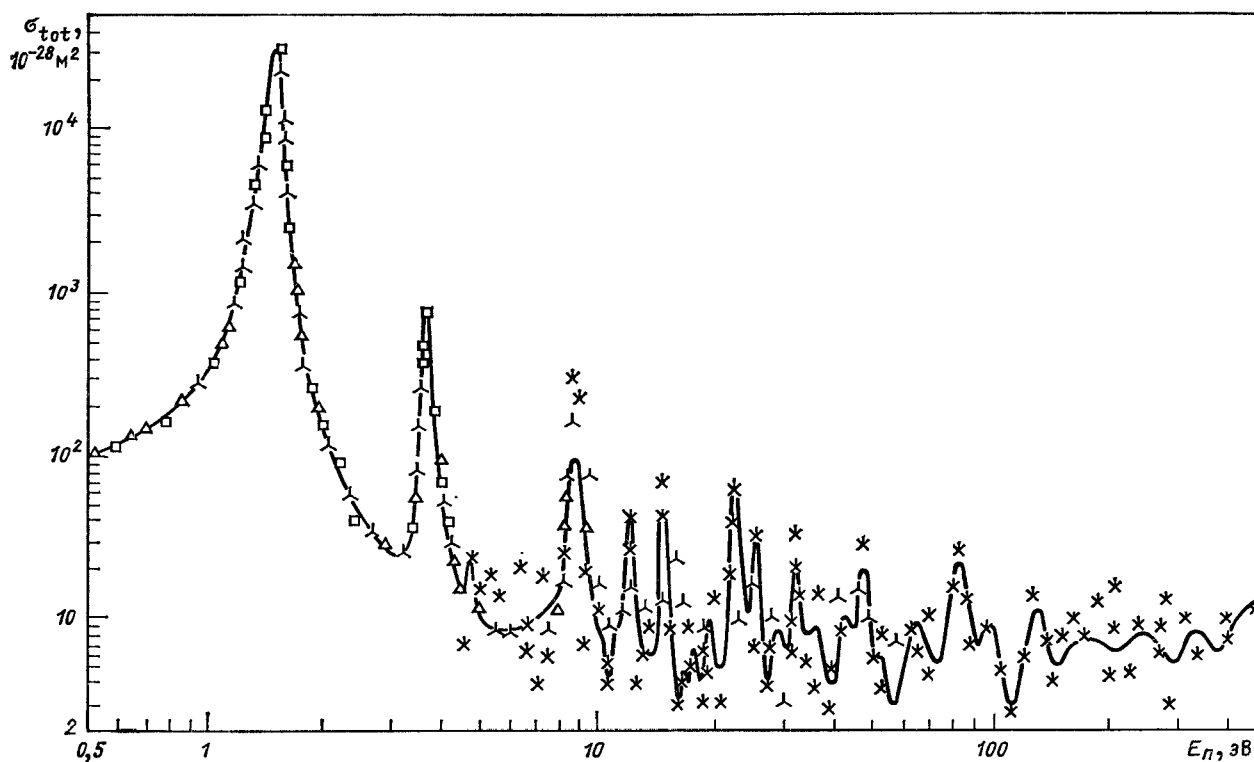


Рис. 41.23. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов ( $0,5 < E_n < 500$  эВ) [29]

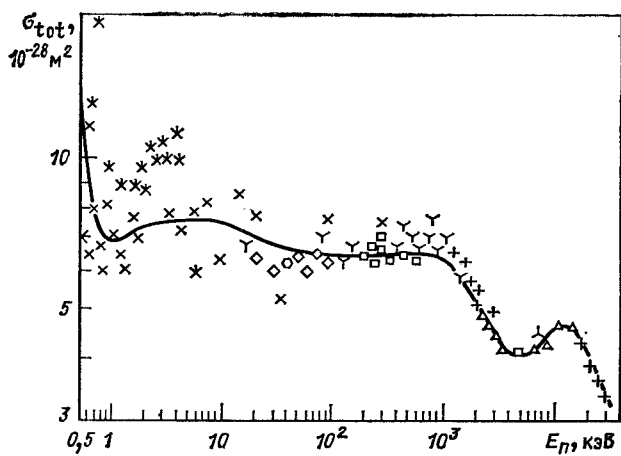


Рис. 41.24. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов ( $0,5 \text{ кэВ} < E_n < 30 \text{ МэВ}$ ) [29]

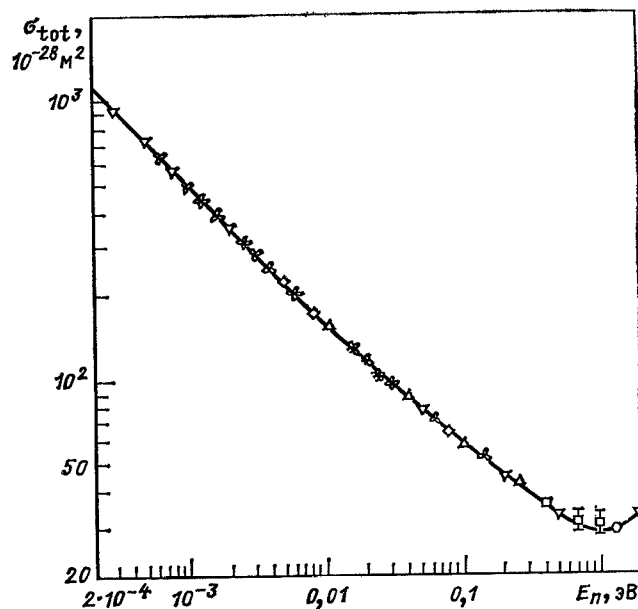


Рис. 41.25. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ( $10^{-4} < E_n < 2$  эВ) [29]

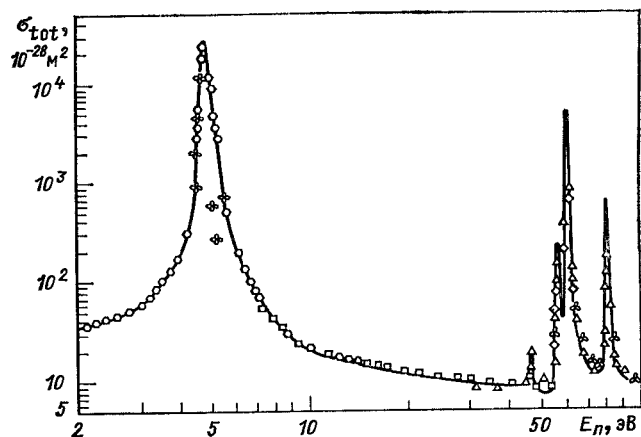


Рис. 41.26. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ( $2 < E_n < 100$  эВ) [29]

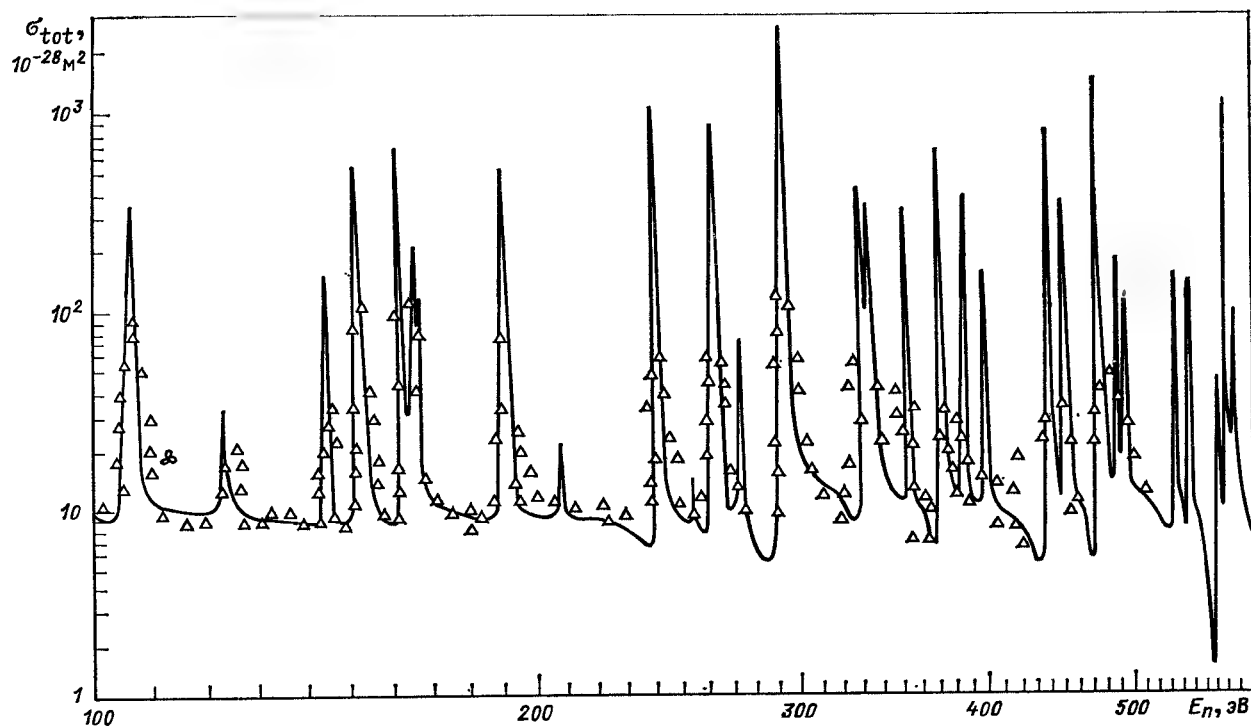


Рис. 41.27. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ( $100 < E_n < 600$  эВ) [29]

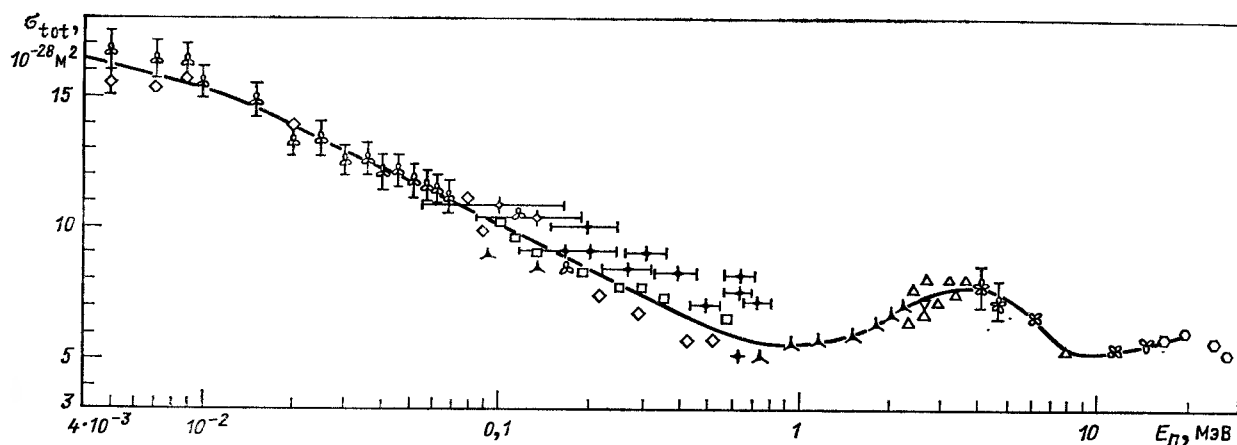


Рис. 41.28. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ( $4 \text{ кэВ} < E_n < 30 \text{ МэВ}$ ) [29]

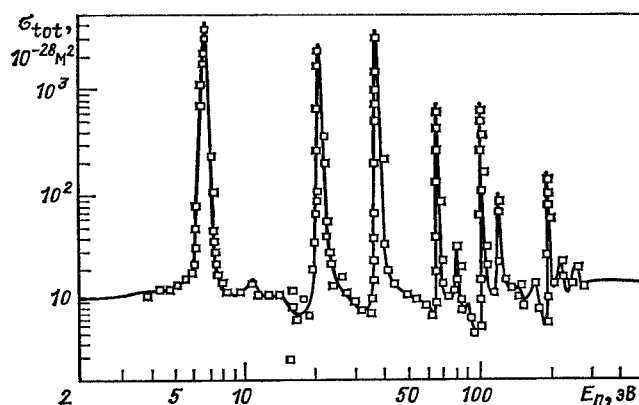


Рис. 41.30. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ( $2 < E_n < 500 \text{ эВ}$ ) [29]

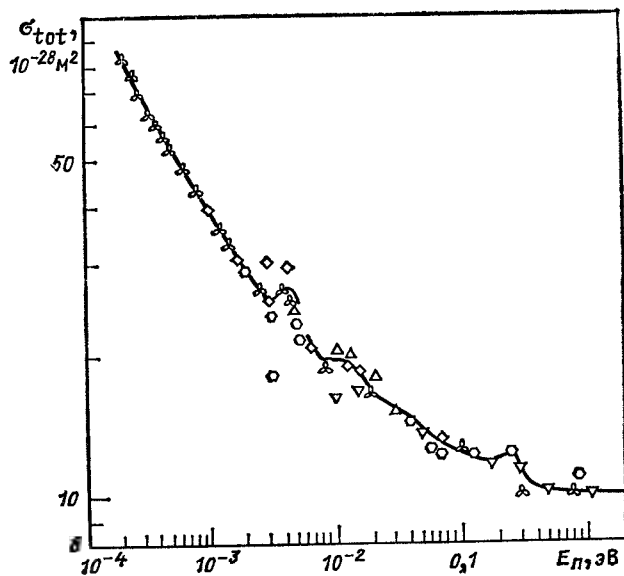


Рис. 41.29. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ( $10^{-4} < E_n < 2 \text{ эВ}$ ) [29]

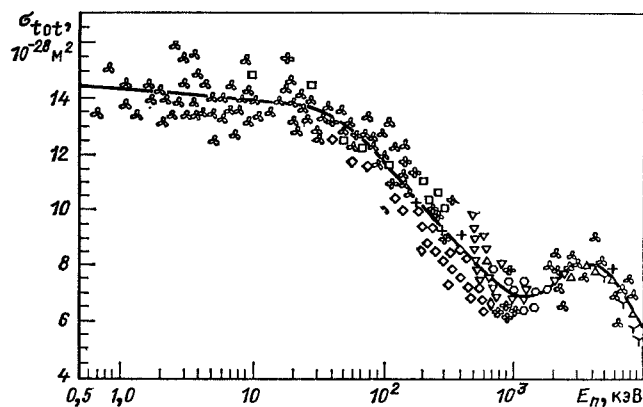


Рис. 41.31. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ( $0,5 \text{ кэВ} < E_n < 10 \text{ МэВ}$ ) [29]



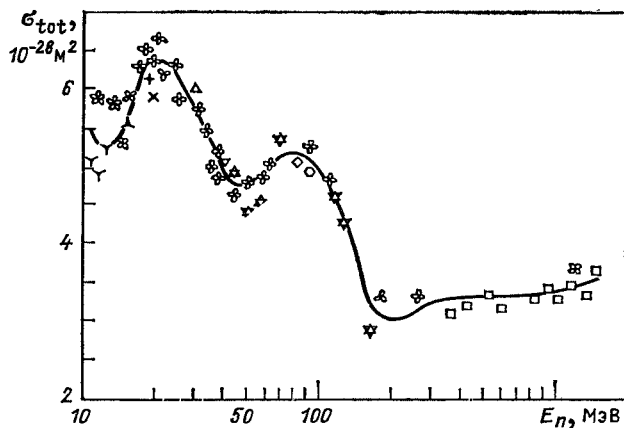


Рис. 41.32. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ( $10 < E_n < 10^3$  МэВ) [29]

#### 41.7. РЕЗОНАНСНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ

Резонансным интегралом называется величина

$$I_i = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \sigma_i(E) \frac{dE}{E},$$

где  $I_i$  — в  $10^{-28}$  м<sup>2</sup>;  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$  — нижняя и верхняя границы энергетического спектра, значения которых зависят от условий эксперимента, эВ;  $i$  — индекс соответствующего процесса ( $i=\gamma$  означает радиационный захват,  $i=f$  — деление и т. д.);  $\sigma_i(E)$  — энергетическая зависимость сечения  $i$ -го процесса. Вклад высокоэнергетической области  $\sigma_i(E)$  в резонансный интеграл, как правило, незначителен, поэтому полагают  $E_{\max} \rightarrow \infty$ .

Когда известно аналитическое выражение энергетической зависимости сечения ядерной реакции, значение резонансного интеграла может быть вычислено. К основным методам определения резонансных интегралов относятся измерения в поле нейтронов, сформированном из теплового максвелловского спектра с соответствующей температурой  $T$ , К, и эпитеплового  $1/E$ -спектра с ниж-

ней границей  $\mu kT$ , где  $\mu$  зависит от типа ядерного реактора;  $k$  — постоянная Больцмана, эВ/К. Для тяжеловодного реактора  $\mu \approx 5$ , для графитового  $\mu \approx 3$ , так что при  $T=293,6$  К  $\mu kT$  равно 0,126 и 0,076 эВ соответственно.

Величина

$$I'_1 = \int_{\mu kT}^{\infty} \left[ \sigma(E) - g(T) \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} \right] \frac{dE}{E}$$

называется избыточным резонансным интегралом, где  $g(T)$  — фактор Весткотта или  $g$ -фактор, определяющий отклонение зависимости сечения  $\sigma(E)$  от закона  $1/\sqrt{E}$ ;  $E_0=0,0253$  эВ;  $\sigma_0$  — значение сечения при  $E_0$ . С учетом того, что граница кадмиевого среза  $E_{Cd}$ , эВ, выше значения  $\mu kT$ , интегрирование выполняется по двум энергетическим областям:

$$I'_1 = \int_{\mu kT}^{E_{Cd}} \left[ \sigma(E) - g(T) \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} \right] \frac{dE}{E} + \int_{E_{Cd}}^{\infty} \left[ \sigma(E) - g(T) \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} \right] \frac{dE}{E} =$$

$$= [\Delta I - \Delta I(1/v)] + [I - I(1/v)] = \Delta I' + I',$$

где  $I'$  — эпикадмиевый резонансный интеграл без части, зависящей от  $1/v$ ;  $\Delta I'$  — часть, обрезаемая кадмиевым фильтром, которая зависит от температуры нейтронов и мала для тепловых энергий (табл. 41.5). Вклад члена  $\Delta I'$  следует учитывать для тех ядер, у которых резонансные пики расположены ниже  $E_{Cd}$  ( $^{138}\text{Cd}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{176}\text{Lu}$ ,  $^{182}\text{Ta}$ ,  $^{191}\text{Ir}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и др.).

Данные по эпикадмиевым резонансным интегралам относятся к  $I'$  или  $I$ , которые включают часть, зависящую от  $1/v$ . Эта часть определяется из выражения

$$I(1/v) = I - I' = \int_{E_{Cd}}^{\infty} g(T) \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} \frac{dE}{E} \approx$$

$$\approx 2g(T) \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E_{Cd}}}.$$

Т а б л и ц а 41.5. Обозначения резонансных интегралов

| Обозначение | Название                                                                      | Пределы интегрирования | Примечания                   |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| $I'$        | Эпикадмиевый избыточный резонансный интеграл                                  | $E_{Cd} - \infty$      | Метод кадмиевого фильтра     |
| $I(1/v)$    | Часть резонансного интеграла, зависящая от $1/v$                              | $E_{Cd} - \infty$      | —                            |
| $I$         | Эпикадмиевый резонансный интеграл, включающий часть, которая зависит от $1/v$ | $E_{Cd} - \infty$      | $I = I' + I(1/v)$            |
| $I'_1$      | Избыточный резонансный интеграл                                               | $\mu kT - \infty$      | Метод без кадмиевого фильтра |
| $\Delta I'$ | Избыточный резонансный интеграл в области $E < E_{Cd}$                        | $\mu kT - E_{Cd}$      | $\Delta I' = I'_1 - I'$      |

Таблица 41.6. Резонансные интегралы [28]

| Символ и массовое число |    | Период полураспада продукта реакции                                                            | $I_{\gamma} \cdot 10^{-28} \text{ М}^2$ | Стандарт    | $E_{\text{Cd}}$ , эВ или $I'$ |
|-------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|-------------------------------|
| H                       | 1  | —                                                                                              | 0,1489                                  | —           | 0,5                           |
|                         | 2  | 12,346 года                                                                                    | $6,298 \cdot 10^{-4}$                   | —           | 0,5                           |
| He                      | 3  | —                                                                                              | 2390 (10)                               | —           | 0,5                           |
| Li                      | 6  | —                                                                                              | 28                                      | Au (1558)   | 0,4                           |
|                         | 7  | —                                                                                              | 425,4                                   | —           | 0,5                           |
|                         |    | 844 мс                                                                                         | 0,01756                                 | —           | 0,5                           |
| Be                      | 9  | $1,6 \cdot 10^6$ лет                                                                           | $4(1) \cdot 10^{-3}$                    | —           | 0,5                           |
| B                       |    | —                                                                                              | 341 (2)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 10 | —                                                                                              | 1722 (5)                                | —           | 0,5                           |
|                         | 11 | 0,0203 с                                                                                       | 0,0757                                  | —           | 0,5                           |
| C                       |    | —                                                                                              | $1,5(2) \cdot 10^{-3}$                  | —           | 0,5                           |
|                         | 12 | —                                                                                              | $1,5(2) \cdot 10^{-3}$                  | —           | 0,5                           |
| N                       |    | —                                                                                              | 0,90 (5)                                | —           | 0,5                           |
|                         | 14 | —                                                                                              | 0,90 (5)                                | —           | 0,5                           |
| O                       |    | —                                                                                              | $0,31(4) \cdot 10^{-3}$                 | —           | 0,5                           |
|                         | 16 | —                                                                                              | $0,27(3) \cdot 10^{-3}$                 | —           | 0,5                           |
| F                       | 19 | 11,0 с                                                                                         | $17,6(3,0) \cdot 10^{-3}$               | —           | 0,5                           |
| Na                      | 23 | 0,02 с, $^{24\text{m}}\text{Na}$<br>15,03 ч, $^{24\text{g}}\text{Na}$<br>$^{24(m+g)}\text{Na}$ | —<br>—<br>—                             | —<br>—<br>— | —<br>—<br>—                   |
|                         |    |                                                                                                | 0,360 (93)                              | Au (1558)   | 0,5                           |
| Mg                      |    | —                                                                                              | 0,076 (20)                              | Au (1556)   | $I' = 0,045(2)$               |
|                         | 24 | —                                                                                              | 0,030 (4)                               | —           | 0,5                           |
| Al                      | 27 | 2,246 мин                                                                                      | 0,175 (5)                               | Au (1551)   | 0,55                          |
| Si                      |    | —                                                                                              | 0,5                                     | Au (1558)   | 0,4                           |
|                         | 28 | —                                                                                              | 0,078 (5)                               | —           | 0,5                           |
| P                       | 31 | 14,3 сут                                                                                       | 0,08 (2)                                | —           | 0,5                           |
| S                       |    | —                                                                                              | 0,6                                     | Au (1558)   | 0,4                           |
|                         | 32 | —                                                                                              | 1,672                                   | —           | 0,5                           |
| Cl                      |    | —                                                                                              | 12,8 (1,7)                              | Li (32,2)   | 0,5                           |
|                         | 35 | $3,5 \cdot 10^5$ лет                                                                           | 17 (2)                                  | —           | 0,5                           |
| Ar                      |    | —                                                                                              | 0,42 (5)                                | —           | 0,5                           |
|                         | 40 | 1,83 ч                                                                                         | 0,41 (3)                                | —           | 0,5                           |
| K                       |    | —                                                                                              | 1,0 (1)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 39 | —                                                                                              | 0,9 (1)                                 | —           | 0,5                           |
| Ca                      |    | —                                                                                              | 0,20 (2)                                | —           | 0,5                           |
|                         |    | $1,3 \cdot 10^5$ лет                                                                           | 0,18 (3)                                | —           | —                             |
|                         | 40 | 18,7 с, $^{46\text{m}}\text{Sc}$                                                               | —                                       | —           | —                             |
| Sc                      | 45 | 84,0 сут, $^{46\text{g}}\text{Sc}$                                                             | —                                       | —           | 0,5                           |
|                         | 51 | $^{46(m+g)}\text{Sc}$                                                                          | 12 (1)                                  | Au (1560)   | 0,5                           |
| Ti                      |    | —                                                                                              | 3,8 (9)                                 | Li (32,2)   | 0,5                           |
|                         | 48 | —                                                                                              | 3,7 (3)                                 | —           | 0,5                           |
| V                       |    | —                                                                                              | 2,7 (1)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 51 | 3,75 мин                                                                                       | 3,53 (1,40)                             | Au (1558)   | 0,5                           |
| Cr                      |    | —                                                                                              | 1,7 (2)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 50 | 27,7 сут                                                                                       | 12,5 (3,24)                             | Au (1558)   | 0,5                           |
|                         | 52 | —                                                                                              | 0,60 (5)                                | —           | 0,5                           |
| Mn                      | 55 | 2,58 ч                                                                                         | 15,6 (5)                                | Au (1560)   | 0,5                           |
| Fe                      |    | —                                                                                              | 1,4 (2)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 56 | —                                                                                              | 1,4 (2)                                 | —           | 0,5                           |
| Co                      | 59 | 10,5 мин, $^{60\text{m}}\text{Co}$                                                             | 39,7 (4,3)                              | Au (1551)   | 0,55                          |
|                         |    | 5,272 года, $^{60\text{g}}\text{Co}$                                                           | 31,4 (4,8)                              | Au (1551)   | 0,55                          |
|                         |    | $^{60(m+g)}\text{Co}$                                                                          | 71,1 (1,8)                              | Au (1551)   | 0,55                          |
| Ni                      |    | —                                                                                              | 2,2 (2)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 58 | $7,5 \cdot 10^4$ лет                                                                           | 2,2 (2)                                 | —           | 0,5                           |
| Cu                      |    | —                                                                                              | 3,2 (3)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 63 | 12,7 ч                                                                                         | 5,3 (1)                                 | Au (1560)   | 0,5                           |
| Zn                      |    | —                                                                                              | 2,3 (3)                                 | —           | 0,5                           |
|                         | 64 | 244 сут                                                                                        | 1,73 (8)                                | Au (1560)   | 0,5                           |
| Ga                      |    | —                                                                                              | 18,7 (1,5)                              | —           | 0,5                           |
|                         | 69 | 21,1 мин                                                                                       | 15,6 (1,5)                              | —           | 0,5                           |
| Ge                      |    | —                                                                                              | 6,1 (1,0)                               | —           | 0,5                           |
| As                      | 75 | 26,4 ч                                                                                         | 75 (3)                                  | Au (1560)   | 0,5                           |

| Символ и мас-<br>совое число |     | Период полураспада<br>продукта реакции                                                                                                               | $I_{\gamma}$ , $10^{-28}$ м <sup>2</sup>                              | Стандарт                              | $E_{\text{Cd}}$ , эВ или $I'$               |
|------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| Se                           | 80  | —<br>57,3 мин, <sup>81m</sup> Se<br>18 мин, <sup>81g</sup> Se<br><sup>81(m+g)</sup> Se                                                               | 9,6 (1,2)<br>0,50 (2)<br>—<br>1,7 (2)                                 | 32,2<br>Au, Co<br>—<br>—              | 0,5<br>0,55<br>—<br>0,5                     |
| Br                           | 79  | —<br>4,42 ч, <sup>80m</sup> Br<br>18 мин, <sup>80g</sup> Br<br><sup>80(m+g)</sup> Br                                                                 | 90 (6)<br>34,5 (4,0)<br>92,0 (10,0)<br>132,5 (10)                     | —<br>—<br>—<br>—                      | 0,5<br>0,5<br>0,5<br>0,5                    |
| Kr                           | 84  | —<br>4,48 ч, <sup>85m</sup> Kr<br>10,76 года, <sup>85g</sup> Kr<br><sup>85(m+g)</sup> Kr                                                             | 53 (7)<br>6,03<br>2,01<br>2,7 (7)                                     | —<br>—<br>—<br>—                      | 0,5<br>$I' = 6$<br>$I' = 2$<br>0,5          |
| Rb                           | 85  | —<br>1,02 мин, <sup>86m</sup> Rb<br>18,7 сут, <sup>86g</sup> Rb<br><sup>86(m+g)</sup> Rb                                                             | 6,0 (5)<br>1,16 (3)<br>—<br>7,5 (5)                                   | —<br>Au, Co<br>—<br>—                 | 0,5<br>0,55<br>—<br>0,5                     |
| Sr                           | 88  | —<br>50,5 сут                                                                                                                                        | 11 (2)<br>0,05 (2)                                                    | —<br>—                                | 0,5<br>0,5                                  |
| Y                            | 89  | 3,19 ч, <sup>90m</sup> Y<br>64,1 ч, <sup>90g</sup> Y<br><sup>90(m+g)</sup> Y                                                                         | 0,88 (8)<br>—<br>1,0 (2)                                              | Au, Co<br>—<br>—                      | 0,55<br>—<br>0,5                            |
| Zr                           | 90  | —                                                                                                                                                    | 1,10 (15)                                                             | —                                     | 0,5                                         |
| Nb                           | 93  | 6,2 мин, <sup>94m</sup> Nb<br>$2,0 \cdot 10^4$ лет, <sup>94g</sup> Nb<br><sup>94(m+g)</sup> Nb                                                       | 0,20 (3)<br>6,56 (1,96)<br>—<br>8,5 (5)                               | —<br>Au (1558)<br>—<br>—              | 0,5<br>0,5<br>—<br>0,5                      |
| Mo                           | 99  | —<br>15,8 с                                                                                                                                          | 22 (2)<br>340 (20)                                                    | —<br>—                                | 0,5<br>0,5                                  |
| Tc                           | 99  | —                                                                                                                                                    | 42 (4)                                                                | —                                     | 0,5                                         |
| Ru                           | 102 | 39,35 сут                                                                                                                                            | 4,1 (4)                                                               | —                                     | 0,5                                         |
| Rh                           | 103 | 4,4 мин, <sup>104m</sup> Rh<br>42 с, <sup>104g</sup> Rh<br><sup>104(m+g)</sup> Rh                                                                    | 89 (7)<br>1111 (74)<br>1100 (50)                                      | Au (1549)<br>Au (1549)<br>—           | $I' = 78$ (7)<br>$I' = 1054$ (74)<br>0,5    |
| Pd                           | 106 | —<br>21,3 с, <sup>107m</sup> Pd<br>$6,5 \cdot 10^6$ лет, <sup>107g</sup> Pd<br><sup>107(m+g)</sup> Pd                                                | 90 (5)<br>—<br>—<br>5,73 (57)                                         | —<br>—<br>—<br>—                      | 0,5<br>—<br>—<br>0,5                        |
| Ag                           | 107 | —<br>127 лет, <sup>108m</sup> Ag<br>2,41 мин, <sup>108g</sup> Ag<br><sup>108(m+g)</sup> Ag                                                           | 747 (20)<br>1,26 (19)<br>—<br>95 (4)                                  | —<br>Co (75)<br>—<br>Au (1558)        | 0,5<br>$I' = 3,0$ (5)<br>—<br>$I' = 79$ (4) |
|                              | 109 | 250,4 сут, <sup>110m</sup> Ag<br>24,6 с, <sup>110g</sup> Ag<br><sup>110(m+g)</sup> Ag                                                                | 71,7 (3,6)<br>1112 (68)<br>1450 (40)                                  | Co (75)<br>Au, Co<br>—                | $I' = 15,5$ (8)<br>0,55<br>0,5              |
| Cd                           | 115 | —<br>2,2 с, <sup>116m2</sup> In<br>54 мин, <sup>116m1</sup> In<br>14 с, <sup>116g</sup> In<br><sup>116(m1+m2)</sup> In<br><sup>116(g+m1+m2)</sup> In | 102 (2)<br>3200 (50)<br>—<br>—<br>690 (45)<br>2114 (23)<br>3300 (850) | —<br>—<br>—<br>—<br>Au<br>Au, Co<br>— | 0,5<br>0,5<br>—<br>—<br>1,3<br>0,55<br>—    |
| Sn                           | 121 | —<br>4,2 мин, <sup>122m</sup> Sb<br>2,7 сут, <sup>122g</sup> Sb<br><sup>122(m+g)</sup> Sb                                                            | 8,5 (2,0)<br>175 (10)<br>—<br>230 (10)                                | —<br>—<br>—<br>Au (1560)              | 0,5<br>0,5<br>—<br>0,5                      |
| Te                           | 125 | —                                                                                                                                                    | 54 (3)                                                                | —                                     | 0,5                                         |
| I                            | 127 | 24,99 мин                                                                                                                                            | 13 730 (2000)<br>150 (3)                                              | —<br>Au (1560)                        | 0,5<br>0,5                                  |

| Символ и массовое число |     | Период полураспада<br>продукта реакции                                           | $I_{\gamma}$ , $10^{-28}$ м <sup>2</sup> | Стандарт                            | $E_{Cd}$ , эВ или $I$ |
|-------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Xe                      | 129 | —                                                                                | 250 (25)                                 | —                                   | 0,5                   |
| Cs                      | 133 | 2,89 ч, $^{134m}Cs$<br>2,05 года, $^{134g}Cs$<br>$^{134(m+g)}Cs$                 | 29, 2(6,2)<br>359 (90)<br>415 (15)       | Au (1550)<br>Au (1550)<br>—         | 0,55<br>0,55<br>0,5   |
| Ba                      | —   | —                                                                                | 7,5 (1,0)                                | —                                   | 0,5                   |
| La                      | 138 | 83,3 мин                                                                         | 0,4 (2)                                  | Au (1560)                           | 0,5                   |
| —                       | —   | —                                                                                | 19 (1)                                   | Au (1558)                           | 0,5                   |
| —                       | 139 | 40,22 ч                                                                          | 12,5 (4)                                 | Au (1560)                           | 0,5                   |
| Ce                      | —   | —                                                                                | 3,0 (8)                                  | —                                   | 0,5                   |
| —                       | 140 | 32,5 сут                                                                         | 0,43 (2)                                 | Au (1550)                           | 0,55                  |
| Pr                      | 141 | 19,2 ч                                                                           | 14,1 (2)                                 | —                                   | 0,5                   |
| Nd                      | —   | —                                                                                | 45 (5)                                   | —                                   | 0,5                   |
| Pm                      | 147 | 41,3 сут, $^{148m}Pm$<br>5,37 сут, $^{148g}Pm$<br>$^{148(m+g)}Pm$                | 1026 (280)<br>1274 (66)<br>3220          | —<br>—<br>Au (1558)                 | 0,5<br>0,5<br>—       |
| Sm                      | —   | —                                                                                | 1400 (20)                                | —                                   | 0,5                   |
| Eu                      | —   | —                                                                                | 6320 (869)                               | Au (1551)                           | 0,2                   |
| —                       | 153 | 8,5 года                                                                         | 3414 (197)                               | Au (1551)                           | 0,55                  |
| Gd                      | —   | —                                                                                | 390 (10)                                 | —                                   | 0,5                   |
| Tb                      | 159 | 72,1 сут                                                                         | 400 (24)                                 | Au (1558)                           | $I' = 390$ (24)       |
| Dy                      | —   | —                                                                                | 1600 (100)                               | —                                   | 0,5                   |
| Ho                      | 165 | 1200 лет, $^{166m}Ho$<br>27,2 ч, $^{166g}Ho$<br>$^{166(m+g)}Ho$                  | —<br>660 (30)<br>700 (20)                | —<br>Au (1550)<br>—                 | —<br>0,5<br>0,5       |
| Er                      | —   | —                                                                                | 740 (10)                                 | —                                   | 0,5                   |
| Tm                      | —   | 0,004 мс, $^{m}Tm$<br>130 сут, $^{g}Tm$<br>$^{(m+g)}Tm$                          | —<br>—<br>1548 (56)                      | —<br>—<br>Au (1550)                 | —<br>—<br>0,55        |
| Yb                      | —   | —                                                                                | 182 (10)                                 | —                                   | 0,5                   |
| Lu                      | —   | —                                                                                | 900 (50)                                 | —                                   | 0,5                   |
| —                       | 175 | 3,69 ч, $^{176m}Lu$                                                              | 523 (57)                                 | Au (1551)                           | 0,55                  |
| Hf                      | —   | —                                                                                | 2000 (100)                               | —                                   | 0,5                   |
| Ta                      | —   | —                                                                                | 720 (25)                                 | Au (1575)                           | 0,5                   |
| —                       | 181 | 16,5 мин, $^{182m}Ta$<br>115,1 сут, $^{182g}Ta$<br>$^{182(m+g)}Ta$               | 0,415 (110)<br>717 (58)<br>717 (58)      | Au (1551)<br>Au (1551)<br>Au (1551) | 0,55<br>0,55<br>0,55  |
| W                       | —   | —                                                                                | 352 (30)                                 | —                                   | 0,5                   |
| Os                      | —   | —                                                                                | 209                                      | Au (1558)                           | 0,5                   |
| Ir                      | —   | —                                                                                | 2250 (200)                               | —                                   | 0,5                   |
| —                       | 193 | 171 сут, $^{194m}Ir$<br>19 ч, $^{194g}Ir$<br>$^{194(m+g)}Ir$                     | —<br>1370 (150)<br>1386 (110)            | —<br>—<br>Au (1550)                 | —<br>0,5<br>0,55      |
| Pt                      | —   | —                                                                                | 140 (6)                                  | —                                   | 0,5                   |
| Au                      | 197 | 2,7 сут                                                                          | 1560 (40)                                | —                                   | 0,5                   |
| Hg                      | —   | —                                                                                | 73 (10)                                  | —                                   | 0,5                   |
| Tl                      | —   | —                                                                                | 12 (1)                                   | —                                   | 0,5                   |
| —                       | 205 | 4,19 мин, $^{206m}Tl$                                                            | 0,7 (2)                                  | —                                   | 0,5                   |
| Pb                      | —   | —                                                                                | 0,16 (4)                                 | —                                   | 0,5                   |
| —                       | 207 | —                                                                                | 0,4 (2)                                  | —                                   | 0,5                   |
| Bi                      | 209 | 3,5·10 <sup>6</sup> лет, $^{210m}Bi$<br>5,01 сут, $^{210g}Bi$<br>$^{210(m+g)}Bi$ | —<br>—<br>0,19 (3)                       | —<br>—<br>—                         | —<br>—<br>0,5         |
| Ra                      | 226 | 41,2 мин                                                                         | 222 (15)                                 | —                                   | 0,5                   |
| Ac                      | 227 | 6,13 ч                                                                           | 1017 (103)                               | Co (70)                             | 0,5                   |

Таблица 41.7. Резонансные интегралы делящихся элементов [25]

| Символ и массовое число | Период полураспада      | $g_{\gamma}$ (300 К) | $I_{\gamma}$ , $10^{-28}$ м <sup>2</sup> | $g_f$ (300 К) | $I_f$ , $10^{-28}$ м <sup>2</sup> |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Th 228                  | 1,913 года              | —                    | 1000                                     | —             | —                                 |
| 229                     | 7300 лет                | 1,043                | 1000 (180)                               | 1,025         | 464 (70)                          |
| 230                     | 80 000 лет              | 1,013                | 1010 (30)                                | —             | —                                 |
| 232                     | $1,4 \cdot 10^{10}$ лет | 0,995                | 85 (3)                                   | —             | 0,619                             |
| 233                     | 22,3 мес                | —                    | 400 (100)                                | —             | —                                 |
| Pa 231                  | 32 760 лет              | 1,020                | 470 (100)                                | —             | —                                 |
| 233                     | 27,0 сут                | 0,980                | 895 (30)                                 | —             | —                                 |
| U 232                   | 72 года                 | 0,973                | 280 (15)                                 | 0,976         | 350 (100)                         |
| 233                     | 159 200 лет             | 1,022                | 140 (6)                                  | 0,998         | 764 (13)                          |
| 234                     | 244 600 лет             | 0,989                | 645 (70)                                 | —             | —                                 |
| 235                     | $7,038 \cdot 10^8$ лет  | 0,981                | 144 (6)                                  | 0,980         | 275 (5)                           |
| 236                     | $2,342 \cdot 10^7$ лет  | 1,002                | 365 (20)                                 | —             | —                                 |
| 237                     | 6,75 сут                | —                    | 1200 (200)                               | —             | —                                 |
| 238                     | $4,468 \cdot 10^9$ лет  | 1,002                | 278 (5)                                  | —             | 2,03                              |
| Np 237                  | $2,14 \cdot 10^6$ лет   | 0,952                | 660 (50)                                 | —             | 6,9                               |
| 238                     | 2,117 сут               | —                    | —                                        | —             | 880 (70)                          |
| Pu 236                  | 2,85 года               | —                    | 197 [28]                                 | —             | 960 [28]                          |
| 238                     | 87,74 года              | 0,956                | 162 (15)                                 | 0,956         | 23 (5)                            |
| 239                     | 24 110 лет              | 1,131                | 190 (20)                                 | 1,065         | 310 (10)                          |
| 240                     | 6553 года               | 1,028                | 8260 (250)                               | —             | —                                 |
| 241                     | 14,7 года               | 1,04                 | 162 (8)                                  | 1,046         | 570 (17)                          |
| 242                     | $3,76 \cdot 10^5$ лет   | 1,010                | 1280 (50)                                | —             | 4,7 (4,7)                         |
| 243                     | 4,956 ч                 | —                    | 265 (60)                                 | —             | 540 (140)                         |
| Am 241                  | 432,6 года              | 0,994                | 1400 (90)                                | 1,014         | 22 (2)                            |
| 241                     | 432,6 года              | —                    | 1190 (80), (g)                           | —             | —                                 |
| 241                     | 432,6 года              | —                    | 220 (15), (m)                            | —             | —                                 |
| 242g                    | 16,01 ч                 | —                    | 300                                      | —             | —                                 |
| 242m                    | 141 год                 | 1,104                | 230 (100)                                | 1,100         | 1900 (300)                        |
| 243                     | 7380 лет                | 1,013                | 2050 (100)                               | —             | 10 (6)                            |
| 243                     | 7380 лет                | —                    | 110 (10), (g)                            | —             | —                                 |
| 243                     | 7330 лет                | —                    | 1940 (100), (m)                          | —             | —                                 |
| Cm 242                  | 162,8 сут               | 0,927                | 150 (40)                                 | —             | —                                 |
| 243                     | 28,5 года               | —                    | 215 (20)                                 | —             | 1550 (200)                        |
| 244                     | 18,11 года              | 1,001                | 625 (50)                                 | 0,998         | 19 (2)                            |
| 245                     | 8500 лет                | 0,936                | 104 (8)                                  | 0,942         | 790 (40)                          |
| 246                     | 4700 лет                | 1,005                | 117 (8)                                  | 1,006         | 12,2                              |
| 247                     | $1,6 \cdot 10^7$ лет    | 1,002                | 500 (75)                                 | 0,995         | 750 (100)                         |
| 248                     | $3,5 \cdot 10^5$ лет    | 1,002                | 265 (25)                                 | —             | 14 (2)                            |
| Bk 249                  | 321,4 сут               | —                    | 1400 (700)                               | —             | —                                 |
| Cf 249                  | 351 год                 | —                    | 660 (120)                                | —             | 1900 (100)                        |
| 250                     | 13,1 года               | —                    | 8300 (4000)                              | —             | —                                 |
| 251                     | 900 лет                 | —                    | 1590 (70)                                | —             | 5400 (800)                        |
| 252                     | 2,84 года               | —                    | 43 (4)                                   | —             | 110 (20)                          |
| 253                     | 17,8 сут                | —                    | 12 (2)                                   | —             | 2000 (500)                        |
| Es 253                  | 20,47 сут               | —                    | 7300 (400)                               | —             | —                                 |
| 253g                    | 20,47 сут               | —                    | 4300 (220)                               | —             | —                                 |
| 253m                    | 20,47 сут               | —                    | 3000 (180)                               | —             | —                                 |
| 254                     | 276 сут                 | —                    | —                                        | —             | 2200 (100)                        |
| Fm 257                  | 100,5 сут               | —                    | 5000 [28]                                | —             | —                                 |

В табл. 41.6 и 41.7 приведены значения резонансных интегралов; для некоторых элементов в пятой колонке даны дополнительные сведения о значении эпикадмиевого избыточного резонансного интеграла  $I'$ . Кроме того, для большинства элементов указаны эталонный образец и значение его резонансного интеграла, которые были использованы при обработке экспериментальных данных. Рекомендуются также данные [6, 21, 44].

#### 41.8. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ ( $n, 2n$ )

Реакция ( $n, 2n$ ) относится к числу пороговых, и когда энергия нейтрона превышает на несколько мегаэлектрон-вольт значение пороговой энергии, эта реакция, как правило, протекает с большой вероятностью. Порог реакции ( $n, 2n$ ) равен приблизительно энергии связи нейтрона в ядре-мишени, поэтому она протекает только при взаимодействии с нейтронами энергией выше 8 МэВ. Исключение составляет реакция на бериллии, для которой порог равен примерно 2 МэВ.

Значения сечений ядерной реакции ( $n, 2n$ ) для различных нуклидов, усредненные по спектру нейтронов деления  $^{235}\text{U}$ , и энергетические зависимости сечения ядерной реакции ( $n, 2n$ ) для  $^9\text{Be}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  приведены в табл. 41.8 и на рис. 41.33—41.38.

Для оценки сечения ядерной реакции ( $n, 2n$ ) в области энергий нейтронов приблизительно от 14 до 15 МэВ может быть использована следующая формула:

$$\sigma_{(n, 2n)} = \begin{cases} (1000 + 7,5A) \left( 7,8 \frac{N-Z}{A} - 0,234 \right), & \text{если } \frac{N-Z}{A} \leq 0,13; \\ (1000 + 7,5A) \left( 0,65 + \frac{N-Z}{A} \right), & \text{если } \frac{N-Z}{A} > 0,13, \end{cases}$$

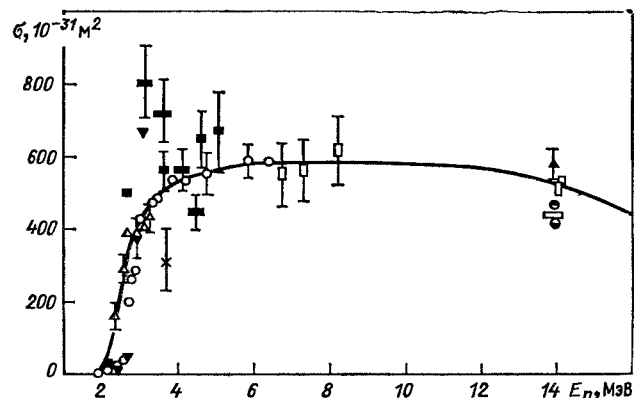


Рис. 41.33. Зависимость сечения ядерной реакции  $^9\text{Be}(n, 2n)^9\text{Be}$  от энергии нейтронов [30]

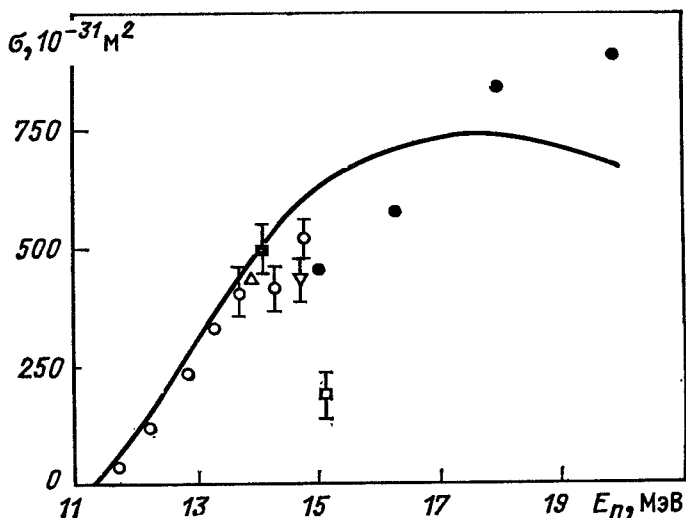


Рис. 41.34. Зависимость сечения ядерной реакции  $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$  от энергии нейтронов [30]

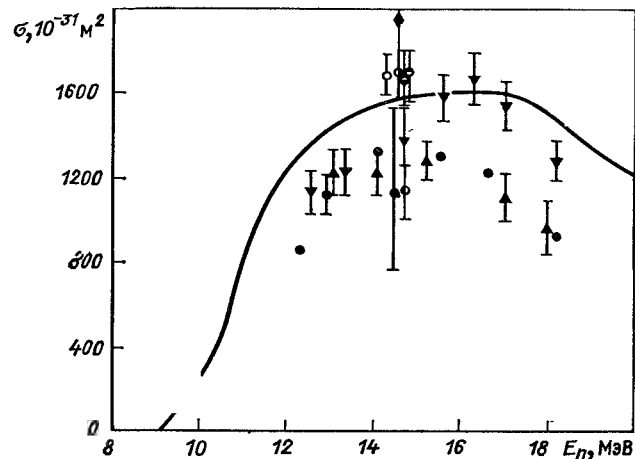


Рис. 41.35. Зависимость сечения ядерной реакции  $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$  от энергии нейтронов [30]

где  $\sigma_{(n, 2n)}$  — в  $10^{-31} \text{ м}^2$ ;  $N$  и  $Z$  — число нейтронов и протонов в ядре-мишени с массовым числом  $A$ . Расчетные значения согласуются с экспериментальными данными в пределах 10—15% для ядер с параметрами  $(N-Z)/A > 0,06$ . При  $(N-Z)/A < 0,06$  результаты вычислений существенно превышают экспериментальные сечения из-за того, что при выводе формулы не учитывалась конкурирующая реакция ( $n, np$ ) [30].

Таблица 41.8. Сечения реакций, вызываемых нейтронами с энергией около 14,5 МэВ и нейтронами спектра деления [30, 31]

| Ядро-мишень | Ядерная реакция     | Остаточное ядро | Период полураспада продукта реакции | Энергия реакции, МэВ | Сечение при $E = 14,5 \text{ МэВ}$ , $10^{-21} \text{ м}^2$ | Сечение, усредненное по спектру деления $^{235}\text{U}$ , $10^{-21} \text{ м}^2$ |
|-------------|---------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Li-6        | (n, p)              | He-6            | 0,808 с                             | -2,73                | 8,6 (2)                                                     | 4,18                                                                              |
|             | (n, $\alpha$ )      | H-3             | 12,34 года                          | 4,78                 | 25 (3)                                                      | —                                                                                 |
|             | (n, 2n)             | —               | —                                   | -3,7                 | 72 (5)                                                      | 0,158                                                                             |
|             | (n, np)             | —               | —                                   | -4,65                | 170                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, na)             | H-2             | Стабильное                          | -1,47                | 400                                                         | —                                                                                 |
| Li-7        | (n, t)              | He-4            | »                                   | 4,785                | 10                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, 2n)             | Li-6            | »                                   | -7,25                | 22                                                          | 0,37                                                                              |
|             | (n, np)             | He-6            | 0,808 с                             | -10                  | 105                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, na)             | H-3             | 12,34 года                          | -2,47                | 340                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, d)              | He-6            | 0,808 с                             | -7,76                | 10                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, t)              | —               | —                                   | -3,42                | 55                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, 3n)             | —               | —                                   | -12,92               | 0,2                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, 2na)            | H-2             | Стабильное                          | -8,72                | 33                                                          | —                                                                                 |
| Be-9        | (n, $\gamma$ )      | Be-10           | $2,7 \cdot 10^6$ лет                | 6,81                 | 0,001                                                       | —                                                                                 |
|             | (n, p) [31]         | Li-9            | 0,175 с                             | -12,836              | <4                                                          | $10^{-3}$                                                                         |
|             | (n, $\alpha$ )      | He-6            | 0,808 с                             | -0,6022              | 10 (1)                                                      | 32,8 (3,8)                                                                        |
|             | (n, 2n)             | —               | —                                   | -1,665               | 524 (25)                                                    | 144 (6)                                                                           |
|             | (n, t)              | Li-7            | Стабильное                          | -10,439              | 20                                                          | —                                                                                 |
| B-10        | (n, 2n)             | —               | —                                   | -8,4352              | 27                                                          | 0,18                                                                              |
|             | (n, t)              | —               | —                                   | 0,2318               | 94 (20)                                                     | 23,8                                                                              |
|             | (n, np)             | Be-9            | Стабильное                          | -6,59                | 75                                                          | —                                                                                 |
| B-11        | (n, p)              | Be-11           | 13,57 с                             | -10,726              | 3,3 (7)                                                     | $10^{-3}$                                                                         |
|             | (n, $\alpha$ )      | Li-8            | 0,84 с                              | -6,633               | 30,5 (3)                                                    | 0,14 (7)                                                                          |
|             | (n, 2n)             | B-10            | Стабильное                          | -11,456              | 19                                                          | 0,008                                                                             |
|             | (n, t)              | Be-9            | »                                   | -9,559               | 15                                                          | —                                                                                 |
| C-12        | (n, p)              | B-12            | 0,02 с                              | -12,588              | 0,19                                                        | $0,26 \cdot 10^{-3}$                                                              |
|             | (n, $\alpha$ )      | Be-9            | Стабильное                          | -5,7016              | 80 (20)                                                     | 0,37                                                                              |
|             | (n, 2n)             | C-11            | 20,38 мин                           | -18,723              | 0                                                           | $4,2 (1,4) \cdot 10^{-7}$                                                         |
|             | (n, na)             | —               | —                                   | -7,37                | 190                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | C-14            | 5730 лет                            | 0,626                | 80 (15)                                                     | —                                                                                 |
| N-14        | (n, $\alpha$ )      | B-11            | Стабильное                          | -0,157               | —                                                           | 91                                                                                |
|             | (n, 2n)             | N-13            | 9,97 мин                            | -10,554              | 7,3 (1)                                                     | $0,94 \cdot 10^{-3}$                                                              |
|             | (n, d)              | C-13            | Стабильное                          | -5,326               | 49                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, t)              | C-12            | »                                   | -4,015               | 29                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, np)             | C-13            | »                                   | -7,55                | 46 (13)                                                     | —                                                                                 |
|             | (n, 2a)             | Li-7            | »                                   | -2,62                | 32                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | N-16            | 7,11 с                              | -9,638               | 41 (3)                                                      | 0,019 (1)                                                                         |
|             | (n, $\alpha$ )      | C-13            | Стабильное                          | -2,215               | 103 (20)                                                    | 11,3                                                                              |
| O-16        | (n, 2n)             | O-15            | 122 с                               | -15,669              | 0                                                           | $5,3 (2,4) \cdot 10^{-6}$                                                         |
|             | (n, d)              | N-15            | Стабильное                          | -9,903               | 150                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, np)             | N-15            | »                                   | -12,11               | 15                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, d) [31]         | O-18            | »                                   | -5,77                | 23                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | O-19            | 26,9 с                              | -4,036               | 20 (2)                                                      | 0,83 (2)                                                                          |
| F-19        | (n, $\alpha$ )      | N-16            | 7,11 с                              | -1,523               | 33 (5)                                                      | 15,1 (2)                                                                          |
|             | (n, 2n)             | F-18            | 109,8 мин                           | -10,431              | 57 (10)                                                     | $7,3 (7) \cdot 10^{-3}$                                                           |
|             | (n, t)              | O-17            | Стабильное                          | -7,557               | 10                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | F-20            | 11 с                                | -6,244               | 92                                                          | 0,078                                                                             |
|             | (n, $\alpha$ )      | O-17            | Стабильное                          | -0,588               | 14                                                          | 12                                                                                |
| Ne-20       | (n, 2n)             | Ne-19           | 17,22 с                             | -16,866              | 0                                                           | $10^{-3}$                                                                         |
|             | (n, $\gamma$ ) [31] | Na-24           | 15 ч                                | 6,96                 | 0,24                                                        | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | Ne-23           | 37,24 с                             | -3,596               | 44 (4)                                                      | 1,43 (2)                                                                          |
|             | (n, $\alpha$ )      | F-20            | 11 с                                | -3,866               | 150 (10)                                                    | 0,53 (2)                                                                          |
| Na-23       | (n, 2n)             | Na-22           | 2,6 года                            | -12,418              | 44 (4)                                                      | $2,2 (2) \cdot 10^{-3}$                                                           |
|             | (n, np)             | Ne-22           | Стабильное                          | -8,79                | 18                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, $\gamma$ ) [31] | Mg-25           | »                                   | 7,33                 | 0,25 ( $E=4 \text{ МэВ}$ )                                  | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | Na-24           | 15 ч                                | -4,732               | 186 (15)                                                    | 1,48 (82)                                                                         |
|             | (n, $\alpha$ )      | Ne-21           | Стабильное                          | -2,553               | 63                                                          | 1,8                                                                               |
| Mg-24       | (n, 2n)             | Mg-23           | 11,327 с                            | -16,531              | 0                                                           | 0,002                                                                             |
|             | (n, $\gamma$ ) [31] | Al-28           | 2,24 мин                            | 7,73                 | 0,56                                                        | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | Mg-27           | 9,46 мин                            | -1,828               | 74 (5)                                                      | 3,86 (25)                                                                         |
|             | (n, $\alpha$ )      | Na-24           | 15 ч                                | -3,132               | 118 (5)                                                     | 0,705 (40)                                                                        |
|             | (n, 2n)             | Al-26           | $7,38 \cdot 10^6$ лет               | -13,058              | 7                                                           | $5 \cdot 10^{-3}$                                                                 |

| Ядро-мишень | Ядерная реакция     | Остаточное ядро | Период полураспада продукта реакции | Энергия реакции, МэВ | Сечение при $E = 14,5 \text{ МэВ}$ , $10^{-31} \text{ м}^2$ | Сечение, усредненное по спектру деления $^{235}\text{U}$ , $10^{-31} \text{ м}^2$ |
|-------------|---------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Si-28       | (n, 2n)             | Al-26m          | 6,35 с                              | —                    | 0                                                           | —                                                                                 |
|             | (n, np)             | Mg-26           | Стабильное                          | —8,27                | 50                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, $\gamma$ ) [31] | Si-29           | —                                   | 8,47                 | 0,45                                                        | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | Al-28           | 2,243 мин                           | —3,860               | 260 (25)                                                    | 6,4 (8)                                                                           |
| P-31        | (n, $\alpha$ )      | Mg-25           | Стабильное                          | —2,653               | 11                                                          | 0,56                                                                              |
|             | (n, 2n)             | Si-27           | 4,11 с                              | —17,177              | 0                                                           | $10^{-3}$                                                                         |
|             | (n, np)             | Al-27           | Стабильное                          | —11,59               | 27                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, $\gamma$ ) [31] | P-32            | 14,3 сут                            | 7,94                 | 0,34                                                        | —                                                                                 |
| S-32        | (n, p)              | Si-31           | 2,62 ч                              | —0,709               | 83 (5)                                                      | 35,5 (2,7)                                                                        |
|             | (n, $\alpha$ )      | Al-28           | 2,243 мин                           | —1,944               | 110 (10)                                                    | 1,9 (6)                                                                           |
|             | (n, 2n)             | P-30            | 2,499 мин                           | —12,307              | 12,5 (3)                                                    | $1,09 \cdot 10^{-3}$                                                              |
|             | (n, d)              | Si-30           | Стабильное                          | —5,073               | 15                                                          | —                                                                                 |
| S-32        | (n, He)             | Al-29           | 6,52 мин                            | —13,086              | 0,013                                                       | —                                                                                 |
|             | (n, np)             | Si-30           | Стабильное                          | —7,30                | 100                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, $\gamma$ ) [31] | Si-33           | —                                   | 8,63                 | 0,54                                                        | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | P-32            | 14,3 сут                            | —0,928               | 230 (10)                                                    | 66,8 (3,7)                                                                        |
| Cl-35       | (n, $\alpha$ )      | P-29            | Стабильное                          | 1,526                | 68 (10)                                                     | 43,6                                                                              |
|             | (n, 2n)             | P-31            | 2,61 с                              | —15,088              | 0                                                           | $0,63 \cdot 10^{-5}$                                                              |
|             | (n, t)              | P-30            | 2,499 мин                           | —12,689              | 0                                                           | $1,06 \cdot 10^{-5}$                                                              |
|             | (n, np)             | P-31            | Стабильное                          | —8,86                | 78                                                          | —                                                                                 |
| Ar-40       | (n, p)              | S-35            | 88 сут                              | 0,615                | 110 (10)                                                    | 78 (23)                                                                           |
|             | (n, $\alpha$ )      | P-32            | 14,3 сут                            | 0,938                | 117 (10)                                                    | 8,8 (4,6)                                                                         |
|             | (n, 2n)             | Cl-34           | 1,525 с                             | —12,646              | 9 (1)                                                       | $0,79 \cdot 10^{-3}$                                                              |
|             | (n, 2n)             | Cl-34m          | 32,06 мин                           | —                    | 6 (1)                                                       | $0,51 \cdot 10^{-3}$                                                              |
| K-39        | (n, p)              | Cl-40           | 1,32 мин                            | —6,72                | 18                                                          | 0,01                                                                              |
|             | (n, $\alpha$ )      | S-37            | 5,06 мин                            | —2,486               | 11,3 (2)                                                    | 0,11                                                                              |
|             | (n, 2n)             | Ar-39           | 269 лет                             | —9,871               | 570                                                         | 0,15                                                                              |
|             | (n, np)             | Cl-39           | 56,2 мин                            | —12,51               | 1,7                                                         | —                                                                                 |
| K-39        | (n, p)              | Ar-39           | 269 лет                             | 0,217                | 179 (60)                                                    | 82,2                                                                              |
|             | (n, $\alpha$ )      | Cl-36           | $3,01 \cdot 10^5$ лет               | 1,363                | 115 (30)                                                    | 8,0 (3)                                                                           |
|             | (n, 2n)             | K-38            | 7,71 мин                            | —13,085              | 4 (1)                                                       | $0,37 \cdot 10^{-3}$                                                              |
|             | (n, 2n)             | K-38m           | 0,9256 с                            | —                    | 2 (4)                                                       | —                                                                                 |
| Ca-40       | (n, np)             | Ar-38           | Стабильное                          | —6,38                | 180                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, pa)             | Cl-35           | »                                   | —7,22                | 30                                                          | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | K-40            | $1,28 \cdot 10^9$ лет               | —0,529               | 470 (30)                                                    | 77                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )      | Ar-37           | 35,06 сут                           | 1,748                | 320                                                         | 13 (6)                                                                            |
| Sc-45       | (n, 2n)             | Ca-39           | 0,86 с                              | —15,634              | 0                                                           | $3 \cdot 10^{-5}$                                                                 |
|             | (n, t)              | K-38            | 7,71 мин                            | —12,933              | 0,027                                                       | —                                                                                 |
|             | (n, np)             | K-39            | Стабильное                          | —8,33                | 200                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, pa)             | Ar-36           | »                                   | —7,04                | 23                                                          | —                                                                                 |
| Sc-45       | (n, p)              | Ca-45           | 163 сут                             | 0,526                | 58 (6)                                                      | 15 (12)                                                                           |
|             | (n, $\alpha$ )      | K-42            | 12,36 ч                             | —0,395               | 55 (5)                                                      | 0,182 (12)                                                                        |
|             | (n, 2n)             | Sc-44           | 3,99 ч                              | —11,321              | 340 (20)                                                    | 0,04                                                                              |
|             | (n, 2n)             | Sc-44m          | 2,44 сут                            | —                    | 116 (15)                                                    | 0,012                                                                             |
| Ti-48       | (n, He)             | K-43            | 22,6 ч                              | —11,341              | 0,0086                                                      | —                                                                                 |
|             | (n, 2p)             | K-44            | 22,15 мин                           | —9,65                | 0,21                                                        | —                                                                                 |
|             | (n, p)              | Sc-48           | 43,8 ч                              | —3,208               | 66 (5)                                                      | 0,3 (18)                                                                          |
|             | (n, $\alpha$ )      | Ca-45           | 163 сут                             | —2,033               | 31 (8)                                                      | 0,013 (6)                                                                         |
| V-51        | (n, 2n)             | Ti-47           | Стабильное                          | —11,628              | 550                                                         | 0,016                                                                             |
|             | (n, np)             | Sc-47           | 3,4 сут                             | —11,45               | 10                                                          | 0,0013                                                                            |
|             | (n, p)              | Ti-51           | 5,8 мин                             | —1,676               | 33 (3)                                                      | 0,456 (23)                                                                        |
|             | (n, $\alpha$ )      | Sc-48           | 43,8 ч                              | —2,055               | 16 (2)                                                      | 0,022 (3)                                                                         |
| Cr-52       | (n, 2n)             | V-50            | Стабильное                          | —11,052              | 660 (50)                                                    | 0,21                                                                              |
|             | (n, pa)             | Ti-47           | »                                   | —10,29               | 2                                                           | 0,000087                                                                          |
|             | (n, p)              | V-52            | 3,76 мин                            | —3,196               | 102 (20)                                                    | 1,09 (8)                                                                          |
|             | (n, $\alpha$ )      | Ti-49           | Стабильное                          | —1,211               | 40 (4)                                                      | 0,083                                                                             |
| Mn-55       | (n, 2n)             | Cr-51           | 27,7 сут                            | —12,041              | 357 (30)                                                    | 0,033                                                                             |
|             | (n, np)             | V-51            | Стабильное                          | —10,5                | 30                                                          | 0,005                                                                             |
|             | (n, p)              | Cr-55           | 3,55 мин                            | —1,806               | 45 (10)                                                     | 1,2                                                                               |
|             | (n, $\alpha$ )      | V-52            | 3,76 мин                            | —0,626               | 29 (2)                                                      | 0,11 (3)                                                                          |
| Mn-55       | (n, 2n)             | Mn-54           | 312,3 сут                           | —10,224              | 809 (35)                                                    | 0,244 (15)                                                                        |
|             | (n, He)             | V-53            | 1,55 мин                            | —12,709              | 0,8 (3)                                                     | —                                                                                 |



| Ядро-мишень | Ядерная реакция | Остаточное ядро | Период полураспада продукта реакции | Энергия реакции, МэВ | Сечение при $E=14,5$ МэВ, $10^{-31}$ м <sup>2</sup> | Сечение, усредненное по спектру деления $^{235}\text{U}$ , $10^{-31}$ м <sup>2</sup> |
|-------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Fe-56       | (n, p)          | Mn-56           | 2,579 ч                             | -2,918               | 110 (10)                                            | 1,03 (75)                                                                            |
|             | (n, $\alpha$ )  | Cr-53           | Стабильное                          | 0,321                | 40                                                  | 0,397 (12)                                                                           |
|             | (n, 2n)         | Fe-55           | 2,72 года                           | -11,203              | 540 (40)                                            | 0,0754                                                                               |
|             | (n, t)          | Mn-54           | 312,3 сут                           | -11,931              | 0,045                                               | —                                                                                    |
| Co-59       | (n, np)         | Mn-55           | Стабильное                          | -10,19               | 35                                                  | 0,0051                                                                               |
|             | (n, p)          | Fe-59           | 45,1 сут                            | -0,783               | 60 (10)                                             | 1,42 (14)                                                                            |
|             | (n, $\alpha$ )  | Mn-56           | 2,579 ч                             | 0,320                | 29 (2)                                              | 0,143 (10)                                                                           |
|             | (n, 2n)         | Co-58           | 70,78 сут                           | -10,46               | 707 (70)                                            | 0,40 (4)                                                                             |
| Ni-58       | (n, 2n)         | Co-58m          | 9,15 ч                              | —                    | 380                                                 | —                                                                                    |
|             | (n, He)         | Mn-57           | 1,61 мин                            | -11,47               | 0,0046                                              | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Co-58           | 70,78 сут                           | 0,395                | 374 (30)                                            | 108,5 (5,4)                                                                          |
|             | (n, p)          | Co-58m          | 9,15 ч                              | —                    | 200                                                 | 35,4 (2,2)                                                                           |
|             | (n, $\alpha$ )  | Fe-55           | 2,72 года                           | 2,89                 | 120 (15)                                            | 3,0 (9)                                                                              |
|             | (n, 2n)         | Ni-57           | 36,16 ч                             | -12,203              | 30 (3)                                              | 5,77(31) · 10 <sup>-3</sup>                                                          |
|             | (n, t)          | Co-56           | 78,76 сут                           | -11,073              | 0,092                                               | —                                                                                    |
|             | (n, np)         | Co-57           | 270,9 сут                           | -8,18                | 400                                                 | 0,21                                                                                 |
| Cu-63       | (n, na)         | Fe-54           | Стабильное                          | -6,39                | 30                                                  | 0,0014                                                                               |
|             | (n, p)          | Ni-63           | 100,1 года                          | 0,716                | 120 (30)                                            | 9,8                                                                                  |
|             | (n, $\alpha$ )  | Co-60           | 5,27 года                           | 1,715                | 35 (8)                                              | 0,50 (56)                                                                            |
|             | (n, $\alpha$ )  | Co-60m          | 10,47 мин                           | —                    | 25                                                  | —                                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Cu-62           | 9,74 мин                            | -10,854              | 551 (30)                                            | 0,12 (12)                                                                            |
|             | (n, He)         | Co-61           | 1,65 ч                              | -9,528               | 0,113 (4)                                           | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Cu-64           | 12,71 ч                             | 0,208                | 176 (20)                                            | 29,9 (1,6)                                                                           |
|             | (n, $\alpha$ )  | Ni-61           | Стабильное                          | 3,867                | 57,5                                                | 1,1                                                                                  |
|             | (n, 2n)         | Zn-63           | 38,1 мин                            | -11,856              | 178 (15)                                            | 0,017                                                                                |
|             | (n, t)          | Cu-62           | 9,74 мин                            | -10,08               | 0,086 (23)                                          | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Zn-69           | 55,6 мин                            | -0,124               | 34 (3)                                              | 1,5                                                                                  |
|             | (n, p)          | Zn-69m          | 14 ч                                | —                    | 25 (2)                                              | 0,496 (73)                                                                           |
|             | (n, $\alpha$ )  | Cu-66           | 5,1 мин                             | 2,584                | 18 (2)                                              | 0,2                                                                                  |
|             | (n, 2n)         | Ga-68           | 68 мин                              | -10,31               | 945 (50)                                            | 0,227                                                                                |
|             | (n, p)          | Ge-75           | 82,78 мин                           | -0,406               | 19,2 (2)                                            | 0,45 (15)                                                                            |
|             | (n, p)          | Ge-75m          | 48,3 с                              | —                    | 18                                                  | —                                                                                    |
| As-75       | (n, $\alpha$ )  | Ga-72           | 14,1 ч                              | 1,205                | 11,6 (1)                                            | 7,1 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, 2n)         | As-74           | 17,78 сут                           | -10,243              | 1061 (40)                                           | 0,33 (2)                                                                             |
|             | (n, He)         | Ga-73           | 4,86 ч                              | -10,15               | 0,0035                                              | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | As-80           | 16,5 с                              | -5,22                | 7,2                                                 | 3,8 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, $\alpha$ )  | Ge-77           | 11,3 ч                              | -0,95                | 2,6 (4)                                             | 1,2 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, 2n)         | Se-79           | 6,5 · 10 <sup>4</sup> лет           | -9,896               | 1132 (60)                                           | 0,432                                                                                |
|             | (n, 2n)         | Se-79m          | 3,91 мин                            | —                    | 90                                                  | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Se-79           | 6,5 · 10 <sup>4</sup> лет           | 0,641                | 31                                                  | 0,87                                                                                 |
|             | (n, p)          | Se-79m          | 3,91 мин                            | —                    | 10                                                  | —                                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | As-76           | 26,32 ч                             | 1,859                | 12,7 (1,5)                                          | 0,031                                                                                |
|             | (n, 2n)         | Br-78           | 6,46 мин                            | -10,693              | 974 (50)                                            | 0,204                                                                                |
|             | (n, p)          | Br-84           | 31,8 мин                            | -3,92                | 8 (1,5)                                             | 9,3 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, $\alpha$ )  | Se-81           | 18,5 мин                            | -0,4                 | 4,7                                                 | 1,5 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, 2n)         | Kr-83           | Стабильное                          | -10,518              | 1290                                                | 0,33                                                                                 |
|             | (n, p)          | Kr-85           | 10,71 года                          | 0,0955               | 18,3                                                | 0,26                                                                                 |
|             | (n, p)          | Kr-85m          | 4,48 ч                              | —                    | 5 (5)                                               | —                                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Br-82           | 35,3 ч                              | 0,991                | 5,9 (1)                                             | 5,3 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, 2n)         | Rb-84           | 32,77                               | -10,6                | 1123 (100)                                          | 0,37 (1)                                                                             |
|             | (n, 2n)         | Rb-84m          | 20,5 мин                            | —                    | 350                                                 | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Rb-88           | 17,8 мин                            | -4,522               | 15 (2)                                              | 3,8 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
| Sr-88       | (n, $\alpha$ )  | Kr-85           | 10,71 года                          | -0,788               | 6                                                   | 5,9 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, 2n)         | Sr-87           | Стабильное                          | -11,113              | 1200                                                | 0,14                                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Sr-87m          | 2,805 ч                             | —                    | 318 (30)                                            | 0,0451                                                                               |
|             | (n, p)          | Sr-89           | 50,55 сут                           | -0,707               | 24,6 (3)                                            | 0,31 (6)                                                                             |
|             | (n, $\alpha$ )  | Rb-86           | 18,66 сут                           | 0,699                | 5,4 (1)                                             | 8,3 · 10 <sup>-3</sup>                                                               |
|             | (n, 2n)         | Y-88            | 107,15 сут                          | -11,468              | 966 (100)                                           | 0,156 (11)                                                                           |
|             | (n, p)          | Y-90            | 64,1 ч                              | -1,506               | 45 (3)                                              | 0,38 (2)                                                                             |
|             | (n, p)          | Y-90m           | 3,19 ч                              | —                    | 9,1                                                 | —                                                                                    |
| Zr-90       | (n, $\alpha$ )  | Sr-87           | Стабильное                          | 1,75                 | 14                                                  | 0,014                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )  | Sr-87m          | 2,805 ч                             | —                    | 4,1 (3)                                             | —                                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Zr-89           | 78,43 ч                             | -11,983              | 768 (30)                                            | 0,076(1)                                                                             |

| Ядро-мишень | Ядерная реакция | Остаточное ядро | Период полураспада продукта реакции | Энергия реакции, МэВ | Сечение при $E = 14,5 \text{ МэВ}$ , $10^{-81} \text{ м}^2$ | Сечение, усредненное по спектру деления $^{235}\text{U}$ , $10^{-81} \text{ м}^2$ |
|-------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Nb-93       | (n, 2n)         | Zr-89m          | 4,18 мин                            | —                    | 86 (8)                                                      | —                                                                                 |
|             | (n, t)          | Y-88            | 107,15 сут                          | —11,352              | 0,041                                                       | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | Zr-93           | $1,53 \cdot 10^6$ лет               | 0,719                | 35                                                          | 1,0                                                                               |
|             | (n, $\alpha$ )  | Y-90            | 64,1 ч                              | 4,914                | 9,5 (5)                                                     | 0,0974 (68)                                                                       |
|             | (n, $\alpha$ )  | Y-90m           | 3,19 ч                              | —                    | 5                                                           | 0,0267 (17)                                                                       |
|             | (n, 2n)         | Nb-92           | $1,2 \cdot 10^8$ лет                | —8,826               | 1375 (70)                                                   | 1,04                                                                              |
| Mo-98       | (n, 2n)         | Nb-92m          | 10,13 сут                           | —                    | 482 (35)                                                    | 0,475 (32)                                                                        |
|             | (n, He)         | Y-91            | 58,51 сут                           | —7,719               | 0,0031                                                      | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | Nb-98           | 2,86 с                              | —3,82                | 11 (4)                                                      | 0,015                                                                             |
|             | (n, $\alpha$ )  | Zr-95           | 64,05 сут                           | 3,202                | 6,5 (1)                                                     | 0,014 (2)                                                                         |
| Tc-99       | (n, 2n)         | Mo-97           | Стабильное                          | —8,642               | 1370                                                        | 1,3                                                                               |
|             | (n, p)          | Mo-99           | 66,02 ч                             | —                    | 12 (3)                                                      | 0,10                                                                              |
|             | (n, $\alpha$ )  | Nb-96           | 23,35 ч                             | —                    | 7 (1)                                                       | 0,065                                                                             |
|             | (n, 2n)         | Tc-98           | $4,2 \cdot 10^6$ лет                | —                    | 1230 (120)                                                  | 1,02                                                                              |
| Ru-102      | (n, nd)         | Nb-95           | 34,97 сут                           | —                    | 1,3 (2)                                                     | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | Tc-102          | 5,28 с                              | —3,72                | 17,3                                                        | 0,012                                                                             |
|             | (n, p)          | Tc-102m         | 4,35 мин                            | —                    | 5,7                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, $\alpha$ )  | Mo-99           | 66,02 ч                             | 2,502                | 5 (1)                                                       | 0,007                                                                             |
| Rh-103      | (n, 2n)         | Ru-101          | Стабильное                          | —9,216               | 1390                                                        | 0,802                                                                             |
|             | (n, p)          | Ru-103          | 39,35 сут                           | 0,0198               | 16 (1)                                                      | 0,107 (6)                                                                         |
|             | (n, $\alpha$ )  | Tc-100          | 15,8 с                              | 3,48                 | 11 (2)                                                      | 0,016                                                                             |
|             | (n, 2n)         | Rh-102          | 207 сут                             | —9,31                | 1325 (100)                                                  | 0,729                                                                             |
| Pd-106      | (n, 2n)         | Rh-102m         | 2,89 года                           | —                    | 380                                                         | 0,715                                                                             |
|             | (n, He)         | Tc-101          | 14,2 мин                            | —8,55                | 0,016 (7)                                                   | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | Rh-106          | 29,9 с                              | —2,758               | 23 (6)                                                      | 0,04                                                                              |
|             | (n, p)          | Rh-106m         | 132 мин                             | —                    | 5,7                                                         | —                                                                                 |
| Ag-107      | (n, $\alpha$ )  | Ru-103          | 39,35 сут                           | 2,998                | 5,6 (7)                                                     | $7 \cdot 10^{-3}$                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Pd-105          | Стабильное                          | —9,561               | 1400                                                        | $6,11 \cdot 10^{-1}$                                                              |
|             | (n, p)          | Pd-107          | $6,5 \cdot 10^6$ лет                | 0,747                | 41                                                          | 0,47                                                                              |
|             | (n, p)          | Pd-107m         | 21,3 с                              | —                    | 15                                                          | —                                                                                 |
| Cd-114      | (n, $\alpha$ )  | Rh-104          | 42,3 с                              | 4,182                | 10,8                                                        | 0,025                                                                             |
|             | (n, 2n)         | Ag-106          | 23,96 мин                           | —9,551               | 1260 (120)                                                  | 0,601                                                                             |
|             | (n, 2n)         | Ag-106m         | 8,41 сут                            | —                    | 400                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | Ag-114          | 4,52 с                              | —4,22                | 5 (2)                                                       | 0,003                                                                             |
| In-115      | (n, $\alpha$ )  | Pd-111          | 22 мин                              | 1,66                 | 0,65 (1)                                                    | $5 \cdot 10^{-4}$                                                                 |
|             | (n, $\alpha$ )  | Pd-111m         | 5,5 ч                               | —                    | 0,13                                                        | —                                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Cd-113          | Стабильное                          | —9,041               | 1500                                                        | 1,07                                                                              |
|             | (n, 2n)         | Cd-113m         | 13,6 года                           | —                    | 860                                                         | —                                                                                 |
| Sn-120      | (n, p)          | Cd-115          | 53,46 ч                             | 0,668                | 15 (5)                                                      | 0,041                                                                             |
|             | (n, p)          | Cd-115m         | 44,6 сут                            | —                    | 7                                                           | —                                                                                 |
|             | (n, $\alpha$ )  | Ag-112          | 3,12 ч                              | 2,68                 | 2,5 (5)                                                     | $10^{-3}$                                                                         |
|             | (n, 2n)         | In-114          | 71,9 с                              | —9,029               | 1710 (80)                                                   | 1,07                                                                              |
| Sb-121      | (n, 2n)         | In-114m         | 49,5 сут                            | —                    | 1262 (100)                                                  | 0,761                                                                             |
|             | (n, He)         | Ag-113          | 5,37 ч                              | —9,34                | 0,007                                                       | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | In-120          | 3,08 ч                              | —4,82                | 4,3 (7)                                                     | 0,001                                                                             |
|             | (n, $\alpha$ )  | Cd-117          | 2,4 ч                               | 0,96                 | 2,6                                                         | $10^{-4}$                                                                         |
| Te-130      | (n, 2n)         | Sn-119          | Стабильное                          | —9,104               | 1560                                                        | 1,03                                                                              |
|             | (n, p)          | Sn-121          | 27,06 ч                             | 0,395                | 9,1                                                         | 0,16                                                                              |
|             | (n, $\alpha$ )  | In-118          | 5 с                                 | 3,51                 | 3,6                                                         | $4 \cdot 10^{-4}$                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Sb-120          | 15,89 мин                           | —9,248               | 1580 (100)                                                  | 0,846                                                                             |
| I-127       | (n, 2n)         | Sb-120m         | 5,76 сут                            | —                    | 610                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | Sb-130          | 6,33 мин                            | —4,22                | 1,8 (3)                                                     | 0,002                                                                             |
|             | (n, p)          | Sb-130m         | 40,9 мин                            | —                    | 0,6                                                         | —                                                                                 |
|             | (n, $\alpha$ )  | Sn-127          | 2,1 ч                               | 1,810                | 0,4 (1)                                                     | $2,0 \cdot 10^{-4}$                                                               |
| I-127       | (n, 2n)         | Te-129          | 69,6 мин                            | —8,413               | 1700 (120)                                                  | 1,80                                                                              |
|             | (n, 2n)         | Te-129m         | 33,5 сут                            | —                    | 1000                                                        | —                                                                                 |
|             | (n, He)         | Sn-128          | 59,3 мин                            | —10,797              | 0,015 (8)                                                   | —                                                                                 |
|             | (n, p)          | Te-127          | 9,35 ч                              | 0,09                 | 9 (3)                                                       | 0,068                                                                             |
| I-127       | (n, p)          | Te-127m         | 109 сут                             | —                    | 6 (2)                                                       | 0,013 (1)                                                                         |
|             | (n, p)          | Te-127g         | 9,35 ч                              | —                    | —                                                           | 0,009 (5)                                                                         |
|             | (n, $\alpha$ )  | Sb-124          | 60,2 сут                            | 4,279                | 1,4 (2)                                                     | 0,003                                                                             |
|             | (n, 2n)         | I-126           | 12,93 сут                           | —9,139               | 1496 (100)                                                  | 1,05 (65)                                                                         |

| Ядро-мишень | Ядерная реакция | Остаточное ядро | Период полураспада продукта реакции | Энергия реакцн, МэВ | Сечение при $E = 14,5$ МэВ, $10^{-31}$ м <sup>2</sup> | Сечение, усредненное по спектру деления $^{235}\text{U}$ , $10^{-31}$ м <sup>2</sup> |
|-------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Xe-132      | (n, p)          | I-132           | 2,3 ч                               | —2,798              | 3,0 (5)                                               | 0,012                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )  | Te-129          | 69,6 мин                            | 3,372               | 1,7                                                   | $7 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Xe-131          | Стабильное                          | —8,936              | 1670                                                  | 1,068                                                                                |
| Cs-133      | (n, 2n)         | Xe-131m         | 11,9 сут                            | —                   | 770                                                   | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Xe-133          | 5,245 сут                           | 0,355               | 11,3 (2)                                              | 0,081                                                                                |
|             | (n, p)          | Xe-133m         | 2,191 сут                           | —                   | 4,8 (8)                                               | —                                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | I-130           | 12,36 ч                             | 4,448               | 1,3 (3)                                               | 0,0033 (8)                                                                           |
|             | (n, $\alpha$ )  | I-130m          | 9 мин                               | —                   | 0,54 (8)                                              | —                                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Cs-132          | 6,475 сут                           | —8,979              | 1603 (100)                                            | 0,992                                                                                |
| Ba-138      | (n, d)          | Xe-132          | Стабильное                          | —3,87               | 0,9                                                   | —                                                                                    |
|             | (n, He)         | I-131           | 8,04 сут                            | —                   | 0,0032                                                | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Cs-138          | 33,41 мин                           | —4,62               | 3,0 (5)                                               | $5 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Xe-135          | 9,083 ч                             | 3,875               | 2,6 (3)                                               | 0,0019 (3)                                                                           |
|             | (n, $\alpha$ )  | Xe-135m         | 15,65 мин                           | —                   | 0,55                                                  | —                                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Ba-137          | Стабильное                          | —8,612              | 1720                                                  | 1,71                                                                                 |
| La-139      | (n, 2n)         | Ba-137m         | 2,55 мин                            | —                   | 1250                                                  | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Ba-139          | 84,9 мин                            | —1,478              | 4,8 (4)                                               | $4 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Cs-136          | 12,98 сут                           | 4,817               | 1,8 (3)                                               | $2 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
| Ce-140      | (n, 2n)         | La-138          | Стабильное                          | —8,778              | 1710                                                  | 1,40                                                                                 |
|             | (n, p)          | La-140          | 40,22 ч                             | —2,984              | 6,5 (5)                                               | $5 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Ba-137          | Стабильное                          | 5,338               | 11,5 (1)                                              | $3 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Ce-139          | 139,3 сут                           | —9,203              | 1750 (70)                                             | 1,32                                                                                 |
| Pr-141      | (n, 2n)         | Ce-139m         | 56,2 с                              | —                   | 963 (120)                                             | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Ce-141          | 32,5 сут                            | 0,201               | 9 (1)                                                 | 0,035                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )  | La-138          | Стабильное                          | 6,146               | 3,2                                                   | $7 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Pr-140          | 3,39 мин                            | —9,397              | 1660 (200)                                            | 1,1                                                                                  |
| Nd-142      | (n, p)          | Pr-142          | 19,13 ч                             | —1,381              | 14 (2)                                                | 0,042                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )  | Ce-139          | 139,3 сут                           | 6,642               | 7,1 (8)                                               | 0,01                                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Nd-141          | 2,42 ч                              | —9,813              | 1701 (120)                                            | 0,627                                                                                |
|             | (n, 2n)         | Nd-141m         | 62,1 с                              | —                   | 600 (50)                                              | —                                                                                    |
| Sm-152      | (n, p)          | Pm-152          | 3,8 мин                             | —2,62               | 3,7 (4)                                               | $5 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Nd-149          | 1,73 ч                              | 5,275               | 1,7 (2)                                               | $8 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Sm-151          | 90 лет                              | —8,267              | 1855 (150)                                            | 2,34                                                                                 |
| Eu-153      | (n, p)          | Sm-153          | 46,44 ч                             | —0,02               | 6 (1)                                                 | 0,015                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )  | Pm-150          | 2,68 ч                              | 5,83                | 2,2 (3)                                               | $10^{-3}$                                                                            |
|             | (n, 2n)         | Eu-152          | 13,2 года                           | —8,555              | 1950 (200)                                            | 2,15                                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Eu-152m1        | 9,3 ч                               | —                   | 500 (100)                                             | —                                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Eu-152m2        | 96 мин                              | —                   | 70                                                    | —                                                                                    |
| Gd-158      | (n, p)          | Eu-158          | 45,9 мин                            | —2,65               | 2,5                                                   | $4 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Sm-155          | 22,1 мин                            | 5,16                | 1,4                                                   | $3 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Gd-157          | Стабильное                          | —7,931              | 1900                                                  | 3,76                                                                                 |
|             | (n, p)          | Gd-159          | 18,6 ч                              | —0,168              | 4,7 (7)                                               | 0,01                                                                                 |
| Tb-159      | (n, $\alpha$ )  | Eu-156          | 15,19 сут                           | 6,215               | 1,8                                                   | $8 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Tb-158          | 150 лет                             | —8,136              | 1800 (120)                                            | 3,02                                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Tb-158m         | 10,5 с                              | —                   | 450 (65)                                              | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Tb-164          | 2,9 мин                             | —2,56               | 2,8 (5)                                               | $3 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
| Dy-164      | (n, $\alpha$ )  | Gd-161          | 3,6 мин                             | 5,207               | 1,2                                                   | $2 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Dy-163          | Стабильное                          | —7,655              | 1950                                                  | 4,88                                                                                 |
|             | (n, p)          | Dy-165          | 2,334 ч                             | —0,513              | 3,2                                                   | $4 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Tb-162          | 7,7 мин                             | 6,460               | 1,5                                                   | $6 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
| Ho-165      | (n, 2n)         | Ho-164          | 29 мин                              | —7,989              | 2000 (200)                                            | 3,49                                                                                 |
|             | (n, 2n)         | Ho-164m         | 37,5 мин                            | —                   | 1200 (200)                                            | —                                                                                    |
|             | (n, p)          | Ho-166          | 27 ч                                | —1,077              | 4,5 (7)                                               | 0,022                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )  | Dy-163          | Стабильное                          | 7,094               | 2                                                     | $10^{-3}$                                                                            |
| Tm-169      | (n, 2n)         | Er-165          | 10,36 ч                             | —8,474              | 1960 (150)                                            | 2,25                                                                                 |
|             | (n, p)          | Er-169          | 9,3 сут                             | 0,431               | 4,6                                                   | 0,014                                                                                |
|             | (n, $\alpha$ )  | Ho-166          | 27 ч                                | 7,44                | 1,8                                                   | $10^{-3}$                                                                            |
|             | (n, 2n)         | Tm-168          | 93,1 сут                            | —8,06               | 2071 (100)                                            | 3,43                                                                                 |
| Yb-174      | (n, p)          | Tm-174          | 5,4 мин                             | —2,28               | 3,5 (1,0)                                             | $3 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Er-171          | 7,52 ч                              | 6,414               | 1,2 (2)                                               | $2 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | (n, 2n)         | Yb-173          | Стабильное                          | —7,469              | 2020                                                  | 5,67                                                                                 |
| Lu-175      | (n, p)          | Yb-175          | 4,19 сут                            | 0,314               | 3,7 (5)                                               | $8 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | (n, $\alpha$ )  | Tm-172          | 63,6 ч                              | 7,867               | 1,6                                                   | $10^{-3}$                                                                            |

| Ядро-мишень | Ядерная реакция           | Остаточное ядро | Период полураспада продукта реакции | Энергия реакции, МэВ | Сечение при $E = 14,5$ МэВ, $10^{-31}$ м <sup>2</sup> | Сечение, усредненное по спектру деления $^{235}\text{U}$ , $10^{-31}$ м <sup>2</sup> |
|-------------|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Hf-180      | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Lu-174          | 3,31 года                           | —7,659               | 2030 (200)                                            | 4,79                                                                                 |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Lu-174 <i>m</i> | 142 сут                             | —                    | 630 (50)                                              | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Lu-180          | 5,7 мин                             | —2,52                | 1,9                                                   | $10^{-3}$                                                                            |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Yb-177          | 1,9 ч                               | 6,856                | 1,1                                                   | $2 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Hf-179          | Стабильное                          | —7,388               | 2080                                                  | 6,88                                                                                 |
| Ta-181      | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Hf-179 <i>m</i> | 18,68 с                             | —                    | 600                                                   | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Hf-181          | 42,4 сут                            | —0,240               | 4,5 (5)                                               | $1 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Lu-178          | 28,4 мин                            | 7,41                 | 1,4                                                   | $3 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Ta-180          | $10^{13}$ лет                       | —7,644               | 2090 (100)                                            | 4,96                                                                                 |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Ta-180 <i>m</i> | 8,1 ч                               | —                    | 1110 (100)                                            | —                                                                                    |
| W-184       | ( <i>n</i> , He)          | Lu-179          | 4,59 ч                              | —6,56                | 0,0034                                                | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Ta-184          | 8,7 ч                               | —2,248               | 4,0 (1,0)                                             | $2 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Hf-181          | 42,4 сут                            | 7,369                | 1,2 (2)                                               | $2(5) \cdot 10^{-4}$                                                                 |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | W-183           | Стабильное                          | —7,411               | 2100                                                  | 6,55                                                                                 |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | W-183 <i>m</i>  | 5,15 с                              | —                    | 1600                                                  | —                                                                                    |
| Re-187      | ( <i>n</i> , <i>np</i> )  | Ta-183          | 5,1 сут                             | —                    | 0,7 (2)                                               | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | W-187           | 23,9 ч                              | —0,529               | 4,3 (5)                                               | $2 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Ta-184          | 8,7 ч                               | 7,102                | 1,2                                                   | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Re-186          | 90,64 ч                             | —7,371               | 1700 (200)                                            | 10 (6)                                                                               |
|             | ( <i>n</i> , He)          | Ta-185          | 49 мин                              | —6,6                 | 0,004 (3)                                             | —                                                                                    |
| Os-192      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Re-192          | 16 с                                | —3,19                | 1,3                                                   | $3 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | W-189           | 11,5 мин                            | 5,24                 | —                                                     | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Os-191          | 15,4 сут                            | —7,559               | 2120 (150)                                            | 5,40                                                                                 |
| Ir-193      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Os-193          | 31,5 ч                              | —0,350               | 3,8 (5)                                               | $1 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Re-190          | 3,1 мин                             | 6,64                 | 1,1                                                   | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Ir-192          | 74,02 сут                           | —7,772               | 2048 (150)                                            | 3,71                                                                                 |
| Pt-195      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Ir-195          | 2,5 ч                               | —0,153               | 2,0 (5)                                               | $2 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Os-192          | Стабильное                          | 8,711                | 1,1                                                   | $4 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Pt-194          | Стабильное                          | —6,124               | 2190                                                  | 18,5                                                                                 |
| Au-197      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Pt-197          | 18,3 ч                              | 0,036                | 2,1 (2)                                               | $2 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Ir-194          | 19,15 ч                             | 6,979                | 0,35 (5)                                              | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Au-196          | 6,18 сут                            | —8,08                | 2254 (200)                                            | 3,0 (3)                                                                              |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Au-196 <i>m</i> | 9,7 ч                               | —                    | 230                                                   | —                                                                                    |
| Hg-202      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Au-202          | 29 с                                | —2,72                | 1,6                                                   | $4 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Pt-199          | 31 мин                              | 5,706                | 0,9                                                   | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Hg-201          | Стабильное                          | —7,756               | 2160                                                  | 4,45                                                                                 |
| Tl-205      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Hg-205          | 5,2 мин                             | —0,747               | 1,9 (2)                                               | $5 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Au-202          | 29 с                                | 5,68                 | 0,85                                                  | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Tl-204          | 3,78 года                           | —7,541               | 2006 (200)                                            | 5,61                                                                                 |
| Pb-208      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Tl-208          | 3,07 мин                            | —4,211               | 1,0 (5)                                               | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Hg-205          | 5,2 мин                             | 6,186                | 0,8                                                   | $1 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Pb-207          | Стабильное                          | —7,368               | 2300                                                  | 6,18                                                                                 |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Pb-207 <i>m</i> | 0,8 с                               | —                    | 1282                                                  | —                                                                                    |
| Bi-209      | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Pb-209          | 3,31 ч                              | 0,135                | 0,8 (2)                                               | $1 \cdot 10^{-3}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Tl-206          | 4,2 мин                             | 9,634                | 0,8 (3)                                               | $3 \cdot 10^{-4}$                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Bi-208          | $3,68 \cdot 10^5$ лет               | —7,453               | 2261 (100)                                            | 5,92                                                                                 |
| Th-232 [31] | ( <i>n</i> , $\gamma$ )   | Th-233          | 22,2 мин                            | 4,79                 | 5,0                                                   | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | Th-231          | 25,5 ч                              | —6,43                | 1160                                                  | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Ra-229          | —                                   | 8,08                 | 4,6                                                   | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 3 <i>n</i> ) | Th-230          | —                                   | —11,6                | 850                                                   | —                                                                                    |
| U-238 [31]  | ( <i>n</i> , $\gamma$ )   | U-239           | 23,5 мин                            | 4,80                 | 1                                                     | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 2 <i>n</i> ) | U-237           | 6,75 дня                            | —6,14                | 700—900                                               | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , <i>p</i> )   | Pa-238          | —                                   | —3,18                | 1,5                                                   | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , <i>t</i> )   | Pa-236          | 12 мин                              | —5,10                | 0,02                                                  | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , $\alpha$ )   | Th-235          | —                                   | 9,07                 | 1,5                                                   | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , 3 <i>n</i> ) | U-236           | $2,39 \cdot 10^7$ лет               | —11,27               | 500                                                   | —                                                                                    |
|             | ( <i>n</i> , <i>np</i> )  | Pa-237          | 39 мин                              | —7,66                | 0,23                                                  | —                                                                                    |

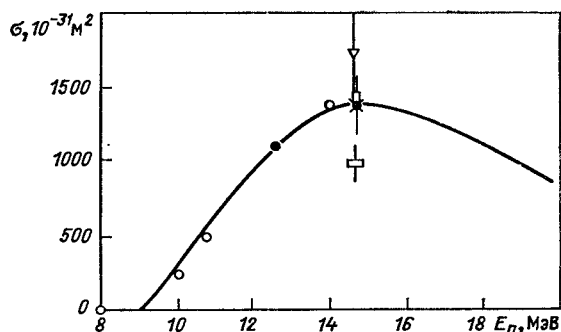


Рис. 41.36. Зависимость сечения ядерной реакции  $^{208}\text{Pb}(n, 2n)^{207m}\text{Pb}$  от энергии нейтронов [30]

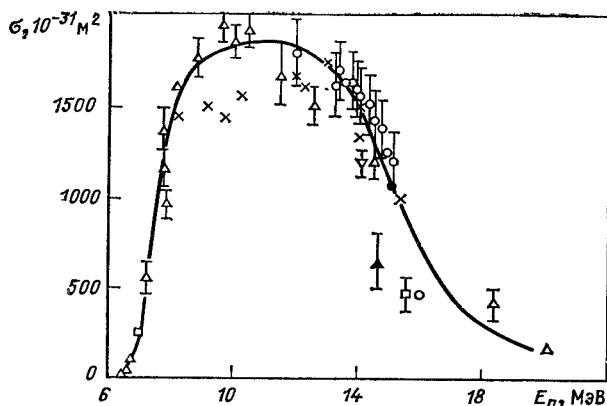


Рис. 41.37. Зависимость сечения ядерной реакции  $^{232}\text{Th}(n, 2n)^{231}\text{Th}$  от энергии нейтронов [30]

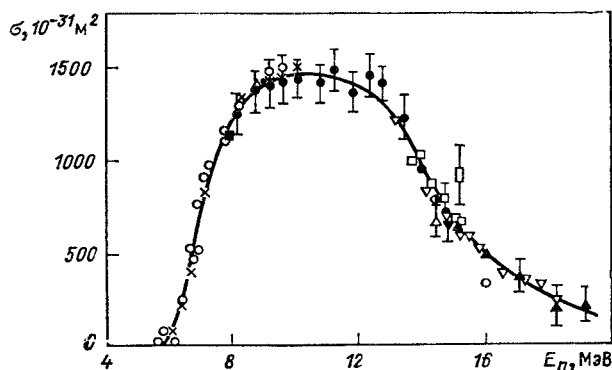


Рис. 41.38. Зависимость сечения ядерной реакции  $^{238}\text{U}(n, 2n)^{237}\text{U}$  от энергии нейтронов [30]

#### 41.9. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ $(n, p)$

Для оценки сечения ядерной реакции  $(n, p)$  в области энергий нейтронов примерно от 14 до 15 МэВ можно воспользоваться формулой, которая дает результаты, согласующиеся в пределах 25%-ной погрешности с экспериментальными данными для большинства ядер [30]:

$$\sigma_{(n,p)} = 43,5 (A^{1/3} + 1) \exp \{0,083 \sqrt{A} \times \\ \times \left[ -50 \frac{(N-Z-1)}{A} + 0,58 \frac{(Z-1)}{A^{1/3}} - 3,26 \right] \},$$

где  $\sigma_{(n,p)}$  — в  $10^{-31} \text{ м}^2$ .

#### 41.10. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ $(n, \alpha)$

Предлагаемая формула для оценки сечения ядерной реакции с участием нейтронов энергией приблизительно от 14 до 15 МэВ дает результаты, согласующиеся с экспериментальными данными в пределах погрешности 40% [30, 31]:

$$\sigma_{(n,\alpha)} = 17,84 \exp \left[ -33 (N-Z)/A \right],$$

где  $\sigma_{(n,\alpha)}$  — в  $10^{-31} \text{ м}^2$ .

#### 41.11. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ $(n, t)$

Для оценки сечения ядерной реакции  $(n, t)$  в области энергий нейтронов примерно от 14 до 15 МэВ предлагается формула, согласующаяся с экспериментальными данными в пределах 70%-ной погрешности:

$$\sigma_{(n,t)} = 4,52 (A^{1/3} + 1) \exp \left[ -10 (N-Z)/A \right],$$

где  $\sigma_{(n,t)}$  — в  $10^{-31} \text{ м}^2$ .

#### 41.12. АКТИВАЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Многие элементы имеют большое сечение активации и дают радиоактивные продукты с удобными для измерений периодами полураспада. Измерение спектров быстрых нейтронов активационным методом основано на применении в качестве детекторов материалов, сечения которых отличаются от нуля лишь после определенной пороговой энергии. Подробно активационные методы спектрометрии нейтронов изложены в [32—36, 44].

Характеристики активационных и пороговых детекторов приведены в табл. 41.9, 41.10. Используются следующие обозначения:  $T_n$  — температура нейтронов; тепловая, резонансная и быстрая — области энергии нейтронов; для резонансной области в скобках указано значение пороговой энергии  $E_{\text{пор}}$ ;  $\gamma_{\text{сп}}$  — метод гамма-спектропии;  $\beta_{\text{сп}}$ ,  $4\pi\beta$ ,  $\gamma$  —  $\gamma$  и т. п. — методы измерения наведенной активности.

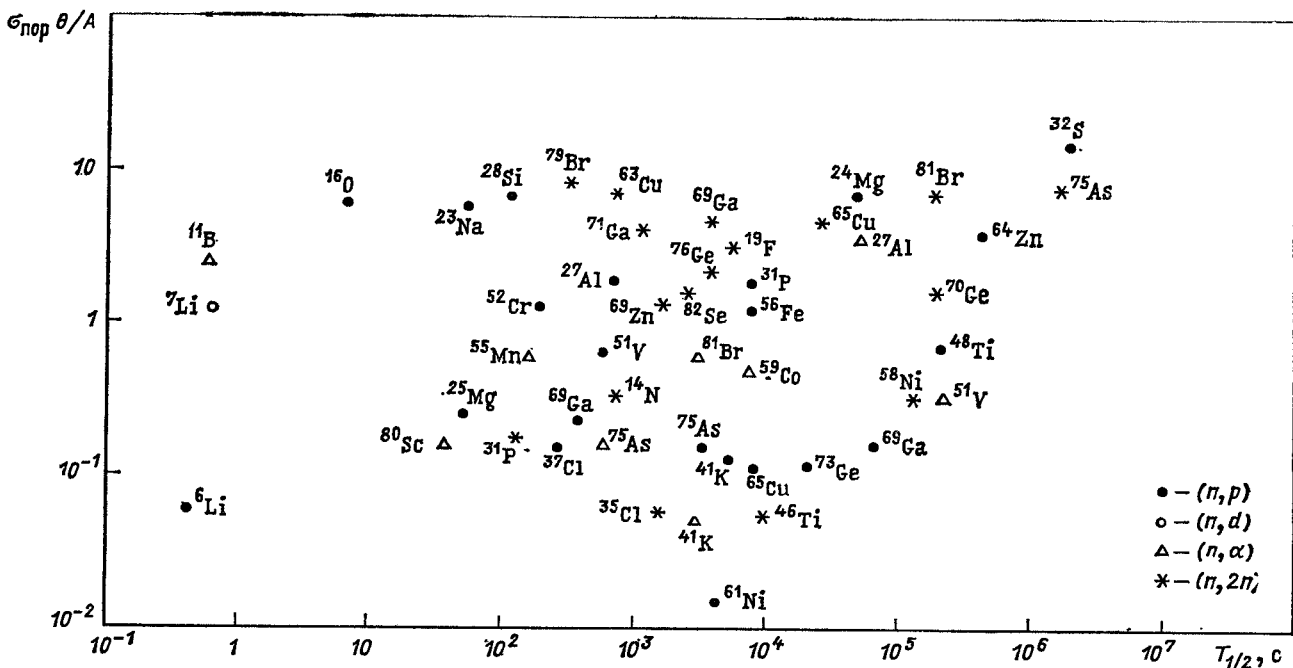
Характеристики детекторов, применяемых при спектрометрии на сборках с источником нейтронов на энергию 14 МэВ, представлены на рис. 41.39 и 41.40 [43].

Таблица 41.9. Краткая характеристика детекторов различного типа [33]

| Элемент; для пороговых детекторов элемент и тип реакции | Материал детектора          | Температура среды, К | Область применения              | Толщина, $10^{-3}$ кг/м <sup>2</sup> | Плотность потока нейтронов, нейтр/(с·м <sup>2</sup> ) | Метод измерения активности      |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Na                                                      | Таблетки (прес-сование)     | 1000                 | Резонансная (2950 эВ)           | 150—2000                             | $10^9—10^{14}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
| V                                                       | Фольга                      | 1300                 | $1/\nu$                         | 50                                   | $10^9—10^{14}$                                        | $4\pi\beta$                     |
| Cr                                                      | Фольга                      | 800                  | Резонансная, $1/\nu$            | 10—400                               | $10^{12}—10^{18}$                                     | $\gamma_{сп}$                   |
| Mn                                                      | Керамика                    | 1300                 | Тепловая, резонансная (337 эВ)  | 3—1000                               | $10^9—10^{18}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Co                                                      | Фольга (электролиз)         | 900                  | Тепловая, резонансная (132 эВ)  | 0,5—700                              | $10^{13}—10^{18}$                                     | $\gamma_{сп}$ , $\gamma-\gamma$ |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Cu                                                      | Фольга                      | 800                  | Резонансная (580 эВ)            | 50—300                               | $10^9—10^{18}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
| Ag                                                      | Сплав                       | 650                  | Резонансная (5,2 эВ)            | 0,5—10                               | $10^{12}—10^{18}$                                     | $\gamma_{сп}$                   |
| In                                                      | Фольга                      | 400                  | Тепловая, резонансная (1,44 эВ) | 0,5—10                               | $10^7—10^{18}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| La                                                      | Керамика                    | 1300                 | Резонансная (73,5 эВ)           | 5—200                                | $10^{10}—10^{18}$                                     | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Sm                                                      | Керамика                    | 1300                 | Резонансная (8,0 эВ)            | 1,0—20                               | $10^{10}—10^{18}$                                     | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Eu                                                      | Керамика                    | 1300                 | $T_n$                           | 0,3—800                              | $10^9—10^{14}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Dy                                                      | Керамика                    | 1300                 | $T_n$ , тепловая, резонансная   | 3—40                                 | $10^9—10^{18}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав с алюминием           | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 400                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Lu                                                      | Керамика                    | 1300                 | $T_n$ , тепловая                | 1,3—800                              | $10^9—10^{18}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| W                                                       | Фольга (прокат, электролиз) | 1300                 | Резонансная (18,8 эВ)           | 0,5—400                              | $10^{10}—10^{18}$                                     | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Au                                                      | Фольга (прокат)             | 900                  | Тепловая                        | 0,5—600                              | $10^9—10^{16}$                                        | $\gamma_{сп}$ , $4\pi\beta$     |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Mg (n, p)                                               | Фольга                      | 650                  | Быстрая, > 7 МэВ                | 1,0—10                               | $10^{12}$                                             | $\gamma_{сп}$                   |
|                                                         | Керамика                    | 1300                 | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Al (n, p)                                               | Фольга                      | 800                  | Быстрая, > 4 МэВ                | 1,0—10                               | $10^{13}$                                             | $\gamma_{сп}$                   |
|                                                         | Керамика                    | 1300                 | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| S (n, p)                                                | Таблетки (прес-сование)     | 400                  | Быстрая, > 2 МэВ                | 10—30                                | $10^{11}$                                             | $\beta_{сп}$                    |
| <sup>56</sup> Fe (n, p)                                 | Фольга (прессование)        | 1200                 | Быстрая, > 3,7 МэВ              | 1—10                                 | $10^{12}$                                             | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
| Ni (n, p)                                               | Фольга                      | 1200                 | Быстрая, > 3,0 МэВ              | 1—10                                 | $10^{12}$                                             | $\gamma_{сп}$                   |
| <sup>65</sup> Cu (n, 2n)                                | Фольга                      | 800                  | Быстрая, > 9,0 МэВ              | 1—10                                 | $10^{13}$                                             | $\gamma_{сп}$ , $\beta_{сп}$    |
| <sup>64</sup> Zn (n, p)                                 | Фольга                      | 800                  | Быстрая, > 3 МэВ                | 1—10                                 | $10^{12}$                                             | $\gamma_{сп}$                   |
| Rh (n, n')                                              | Фольга                      | 1300                 | Быстрая, > 0,8 МэВ              | 0,1—10                               | $10^{11}$                                             | $x$ , $4\pi\beta-x$             |
| In (n, n')                                              | Фольга                      | 400                  | Быстрая, > 1,4 МэВ              | 0,1—10                               | $10^{11}$                                             | $\gamma_{сп}$                   |
|                                                         | Керамика                    | 1300                 | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Er (n, $\gamma$ )                                       | Керамика                    | 1300                 | $T_n$                           | 0,5—40                               | $10^9—10^{18}$                                        | $\gamma_{сп}$                   |
|                                                         | Полиэтилен                  | 350                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |
| Ir (n, $\gamma$ )                                       | Фольга                      | 1300                 | $T_n$ , тепловая, резонансная   | 3—100                                | $10^{12}—10^{18}$                                     | $\gamma_{сп}$                   |
|                                                         | Сплав                       | 650                  | —                               | —                                    | —                                                     | —                               |

Таблица 41.10. Характеристики пороговых детекторов [32]

| Тип ядерной реакции                       | $E_{\text{пор}}$ , МэВ [35] | Период полураспада продукта реакции | $E_{\gamma}$ , МэВ | Выход $\gamma$ -квантов на распад | $E_{\text{эф}}$ , МэВ | $\sigma_{\text{эф}}$ , $10^{-24}$ м <sup>2</sup> |
|-------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| $^{103}\text{Rh}(n, n')^{103m}\text{Rh}$  | 0,1                         | 56,1 мин                            | 0,020              | 1,00                              | 0,8                   | 935 (45)                                         |
| $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$  | 0,32                        | 4,5 ч                               | 0,333              | 0,46                              | 1,15                  | 985 (10)                                         |
| $^{238}\text{U}(n, f)$                    | 0,5                         | —                                   | —                  | —                                 | 1,6                   | 974 (68)                                         |
| $^{232}\text{Th}(n, f)$                   | 1,0                         | —                                   | —                  | —                                 | 1,6                   | 143 (36)                                         |
| $^{64}\text{Zn}(n, p)^{64}\text{Cu}$      | 0,96                        | 12,78 ч                             | 0,511              | 0,38                              | 2,6                   | 158 (8)                                          |
| $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$        | 0,92                        | 14,3 сут                            | $E_{\beta} = 1,71$ | 1,0                               | 2,6                   | 232 (37)                                         |
| $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$      | 1,0                         | 71,3 сут                            | 0,511              | 0,30                              | 2,6                   | 416 (37)                                         |
| $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$      | 1,1                         | 312,6 сут                           | 0,835              | 1,0                               | 3,0                   | 398 (36)                                         |
| $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$      | 1,8                         | 9,46 мин                            | 0,84               | 0,70                              | 4,5                   | 51,3 (4,5)                                       |
| $^{90}\text{Zr}(n, p)^{90}\text{Y}$       | 3,5                         | 64,4 ч                              | $E_{\beta} = 2,27$ | 1,0                               | 6,2                   | 15,8 (1)                                         |
| $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$      | 2,9                         | 2,58 ч                              | 0,847              | 0,99                              | 6,6                   | 65,3 (4,8)                                       |
| $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$      | 4,9                         | 15,0 ч                              | 1,369              | 1,0                               | 7,2                   | 143 (9)                                          |
| $^{59}\text{Co}(n, \alpha)^{56}\text{Mn}$ | 5,0                         | 2,58 ч                              | 0,847              | 0,99                              | 7,1                   | 13,7 (1,2)                                       |
| $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ | 4,8                         | 15,0 ч                              | 1,369              | 1,0                               | 7,4                   | 75,5 (3,2)                                       |
| $^{232}\text{Th}(n, 2n)^{230}\text{Th}$   | 6,5                         | 25,64 ч                             | $E_{\beta} = 0,30$ | 1,0                               | 7,6                   | 1620 (90)                                        |
| $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$     | 10,0                        | 12,78 ч                             | 0,511              | 0,38                              | 11,2                  | 670 (100)                                        |
| $^{55}\text{Mn}(n, 2n)^{54}\text{Mn}$     | 10,4                        | 312,6 сут                           | 0,835              | 1,0                               | 11,7                  | 540 (120)                                        |
| $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$       | 11,0                        | 109,8 мин                           | 0,511              | 1,94                              | 12,8                  | 50 (8)                                           |
| $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$     | 11,0                        | 9,76 мин                            | 0,511              | 1,95                              | 12,9                  | 620 (70)                                         |
| $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$     | 12,5                        | 36,0 ч                              | 1,37               | 0,86                              | 13,7                  | 38,0 (4,4)                                       |
| $^{64}\text{Zn}(n, 2n)^{63}\text{Zn}$     | 12,5                        | 38,4 мин                            | 1,15               | 0,49                              | 14,8                  | 690 (40)                                         |

Рис. 41.39. Значения периода полураспада и величины  $\sigma_{\text{пор}} \theta/A$  для пороговых ядерных реакций ( $1 \leq A \leq 85$ ) [43]:  $\sigma_{\text{пор}}$  — сечение пороговой ядерной реакции при энергии нейтрона 14 МэВ,  $10^{-31}$  м<sup>2</sup>;  $\theta$  — распространность нуклида в относительных единицах

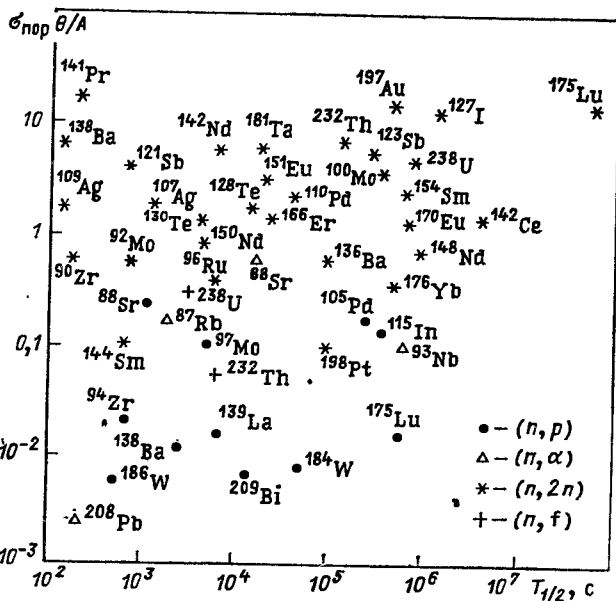


Рис. 41.40. Значения периода полураспада и величины  $\sigma_{пор} \theta/A$  для пороговых ядерных реакций ( $86 \leq A \leq 238$ ) [43]. Обозначения те же, что на рис. 40.39

### 41.13. ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ

В элементарной теории замедления предполагается, что замедление нейтронов происходит исключительно в результате упругих соударений с ядрами среды. При таких соударениях нейтрон теряет часть своей энергии, которая переходит в кинетическую энергию ядра отдачи. После соударения энергия рассеянного нейтрона в ЛСК определяется из соотношения [38]

$$E/E' = (1/2) [1 + \alpha + (1 - \alpha) \cos \theta],$$

$$\alpha = [(A - 1)/(A + 1)]^2,$$

где  $E'$  и  $E$  — энергия нейтрона до и после соударения;  $A$  — масса ядра-мишени;  $\theta$  — угол рассеяния нейтрона в СЦМ.

Угол рассеяния в ЛСК  $\varphi$  (угол между векторами скоростей нейтрона до и после соударения) и угол рассеяния в СЦМ связаны соотношением

$$\cos \varphi = 1 + A \cos \theta / \sqrt{1 + 2A \cos \theta + A^2}.$$

Здесь и выше масса нейтрона принята равной единице.

При упругих соударениях энергия нейтронов изменяется в пределах от  $\alpha E'$  до  $E'$ .

Средняя логарифмическая потеря энергии на одно соударение с ядром массой  $A$  определяется как

$$\xi = (\ln E' - \ln E) = 1 + (A - 1)^2/2A - \ln [(A - 1)/(A + 1)]$$

и не зависит от энергии. При  $A \gg 1$  справедлива формула

$$1/\xi = A/2 + 1/3 + 1/18 A.$$

При  $A=2$  погрешность этой величины менее 1 % [37].

Среднее число соударений  $N$ , необходимое для того, чтобы нейтрон с начальной энергией  $E'$  замедлился до энергии  $E$ , определяется как

$$N = (1/\xi) \ln (E'/E).$$

В табл. 41.11 приведены значения среднего числа соударений, требующихся для замедления нейтрона от 2 МэВ до тепловой энергии (0,0253 эВ).

Таблица 41.11. Свойства некоторых замедлителей [8]

| замедлитель  | $1-\alpha$ | $\xi$   | $\overline{\cos \varphi}$ | $N$  | $A$ |
|--------------|------------|---------|---------------------------|------|-----|
| $^1\text{H}$ | 1,00       | 1,00    | 0,67                      | 18,2 | 1   |
| $^2\text{H}$ | 0,889      | 0,725   | 0,33                      | 25,1 | 2   |
| He           | 0,640      | 0,425   | 0,167                     | 43   | 4   |
| Li           | 0,438      | 0,268   | 0,095                     | 68   | 7   |
| Be           | 0,360      | 0,209   | 0,074                     | 87   | 9   |
| C            | 0,284      | 0,158   | 0,056                     | 115  | 12  |
| O            | 0,222      | 0,120   | 0,042                     | 152  | 16  |
| U            | 0,016      | 0,00838 | 0,0028                    | 2172 | 238 |

Одной из величин, характеризующих меру распространения нейтронов в процессе замедления, является средний квадрат расстояния от источника, на котором нейтроны обладают энергией  $E$ . Средний квадрат перемещения при замедлении равен [38]

$$\bar{r}^2 = \int r^2 W(r, \tau) dr = 2n\tau,$$

где  $W(r, \tau)$  — функция, определяющая нейтронное поле, которое возникло в бесконечной однородной среде от точечного источника моноэнергетических нейтронов, и являющаяся решением уравнения  $\partial W(r, \tau)/\partial \tau = \Delta W(r, \tau)$  с начальным условием  $W(r, 0) = \delta(r)$ ;  $n=1, 2, 3$  для источника в виде плоскости, нити и точки соответственно. Величину  $1/\tau$  называют длиной замедления, а  $\tau$  — возрастом нейтронов. Значения  $\tau$  экспериментально измеряют по активации детектора на различных расстояниях от источника. Обычно определяют  $\tau$  с помощью детектора из  $^{115}\text{In}$ , который имеет резонанс при  $E = 1,46$  эВ.

Добавка  $\Delta\tau$ , связанная с замедлением нейтронов от 1,46 эВ до  $E_c$ , мала по сравнению с  $\tau$  и может быть вычислена приближенно по формуле [38]:

$$\Delta\tau = \int_{E_c}^{1,46 \text{ эВ}} \frac{dE}{3 \xi \Sigma_s \Sigma_{tr} E},$$

где  $\Sigma_{tr}$  — транспортное макроскопическое сечение, оно заменяет полное сечение при расчетах в транспортном приближении:  $\Sigma_{tr} = \Sigma_{tot} + \Sigma_s (1 - \overline{\cos \varphi})$ ,  $\overline{\cos \varphi}$  — средний косинус угла рассеяния в ЛСК.

Значение  $\Delta\tau$ , вычисленное по этой формуле, в той области, где необходимо учитывать влияние химических связей на процесс передачи энергии от нейтронов к ядрам замедлителя, меньше фактического. Возраст  $\tau$ , см<sup>2</sup>, для смеси легкого замедлителя с тяжелыми ядрами нельзя вычислять по приводимой формуле, поскольку в этом случае существенную роль играют неупругие столкновения и анизотропия рассеяния на тяжелых ядрах при больших энергиях.

Время замедления нейтрона до возраста  $\tau$  определяется как

$$T(\tau) = \int_0^\tau T_s(u') \frac{du'}{\xi},$$



где  $T_s(u) = 1/\nu(u) \Sigma_s(u)$  — среднее время между двумя соударениями нейтрона;  $du/\bar{\xi}$  — среднее число соударений на интервале замедления  $du$ . Поскольку для ядер с массовыми числами  $A > 1$  в области энергий до 100 кэВ  $1/\Sigma_{tr} = \text{const}$ , зависимость возраста нейтронов от энергии логарифмическая [13]:

$$\tau(E) = \frac{1}{3\xi \Sigma_{tr} \Sigma_s} \int_E^{E_0} \frac{dE'}{E'} = \frac{1}{3\xi \Sigma_{tr} \Sigma_s} \ln \frac{E_0}{E}.$$

Таблица 41.12. Параметры, характеризующие свойства замедлителей [13]

| Замедлитель      | $\tau$ , см <sup>2</sup> [38] | $T$ , 10 <sup>-5</sup> с |
|------------------|-------------------------------|--------------------------|
| H <sub>2</sub> O | 26,48 (32)                    | 1                        |
| D <sub>2</sub> O | 111 (1)                       | 5                        |
| C                | 282,5 (1,8)                   | 15                       |
| Be               | 86,6 (2,4)                    | 7                        |
| BeO              | 92,0 (1,5)                    | 7,8                      |

Таблица 41.13. Возраст нейтронов для некоторых замедлителей [39]

| Замедлитель<br>(плотность, г/см <sup>3</sup> ) | $\tau$ , см <sup>2</sup> | Источник нейтронов<br>( $E_0$ , МэВ) | Детектор или<br>$E_{гр}$ , эВ |
|------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| H <sub>2</sub> O                               | 5,48 (15)                | Sb- $\gamma$ -Be (0,025)             | In                            |
|                                                | 13,9 (2)                 | Na- $\gamma$ -Be (0,970)             |                               |
|                                                | 27,86 (1)                | Со спектром деления                  |                               |
|                                                | 34,6 (2,2)               | Реакция $D(d,n)$ (2,6)               |                               |
|                                                | 48,5                     | Ra- $\alpha$ -Be                     |                               |
|                                                | 57,3 (2,0)               | Po- $\alpha$ -Be                     |                               |
|                                                | 150,0 (6,0)              | Реакция $T(d,n)$ (14,1)              |                               |
|                                                | 30,3 (1,5)               | Со спектром деления                  |                               |
|                                                | 55                       | Ra- $\alpha$ -Be                     |                               |
|                                                | 62 (5)                   | Po- $\alpha$ -Be                     |                               |
| 50% H <sub>2</sub> O+50% Al                    | 76,8                     | Со спектром деления                  | In                            |
| 50% H <sub>2</sub> O+50% Zr                    | 81,7                     | То же                                | 0,025                         |
| 50% H <sub>2</sub> O+50% Pb                    | 72,8                     | Ra- $\alpha$ -Be                     | In                            |
| 50% H <sub>2</sub> O+50% Fe                    | 57,9                     | То же                                |                               |
| 50% H <sub>2</sub> O+50% Zr                    | 92                       | Po- $\alpha$ -Be                     | 0,025                         |
| D <sub>2</sub> O                               | 109 (3)                  | Со спектром деления                  | In                            |
| C                                              | 120                      | То же                                | 0,025                         |
|                                                | 142—147                  | Sb- $\gamma$ -Be (0,025)             | In                            |
|                                                | 312,5 (5)                | Со спектром деления                  |                               |
| Be (1,85)                                      | 380                      | Ra- $\alpha$ -Be                     |                               |
|                                                | 80,2 (2)                 | Со спектром деления                  | 0,025                         |
| Be (1,78)                                      | 120 (23)                 | Ra- $\alpha$ -Be                     |                               |
| Be (1,84)                                      | 97,2                     | Со спектром деления                  | In                            |
| BeO (2,96)                                     | 93,4 (4,7)               | То же                                | 0,025                         |
| BeO                                            | 105 (10)                 | »                                    | 0,025                         |

Для источника нейтронов с  $E_0 \leq 100$  кэВ время замедления

$$T(E) = \frac{1}{\xi \Sigma_s} \int_E^{E_0} \frac{dE'}{v(E') E'} = \frac{2}{\xi \Sigma_s} \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right).$$

Для малых энергий, т. е.  $E \ll E_0$ ,

$$T(E) \approx 2/\xi v(E) \Sigma_s.$$

В табл. 41.12, 41.13 приведены значения возраста нейтронов от источника со спектром деления при их замедлении до резонансной энергии In (1,46 эВ) и значения  $\tau$  для некоторых замедлителей.

#### 41.14. ДИФФУЗИЯ НЕЙТРОНОВ

Длиной диффузии называется величина  $L = \sqrt{D/\Sigma_a}$ , см, где  $D$  — коэффициент диффузии, см;  $\Sigma_a$  — макроскопическое сечение поглощения, см<sup>-1</sup>. Коэффициент диф-

Таблица 41.14. Время жизни тепловых нейтронов [9]

| Замедлитель         | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Время жизни<br>$t_T$ , 10 <sup>-4</sup> с |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------------------|
| H <sub>2</sub> O    | 1,00                         | 2,13                                      |
| D <sub>2</sub> O    | 1,10                         | 1300                                      |
| C                   | 1,6                          | 129                                       |
| Be                  | 1,85                         | 36,5                                      |
| BeO                 | 2,96                         | 76,0                                      |
| Парафин             | 0,87                         | 1,78                                      |
| Органическое стекло | 1,18                         | 2,32                                      |
| ZrH <sub>1,7</sub>  | 3,48                         | 2,66                                      |

Таблица 41.15. Диффузионные характеристики некоторых веществ [38]

| Вещество         | $1 - \bar{\mu}$<br>[21] | $\xi$ [21] | $L$ , см   | $D$ , см    |
|------------------|-------------------------|------------|------------|-------------|
| H <sub>2</sub> O | —                       | —          | 2,69 (2)   | 0,1423 (19) |
| D <sub>2</sub> O | —                       | —          | 147 (2)    | 0,84 (1)    |
| Be               | 0,9259                  | 0,209      | 24,4 (13)  | 0,487 (5)   |
| BeO              | —                       | —          | 36,5 (3)   | 0,627 (7)   |
| C                | 0,9440                  | 0,158      | 56,4 (6)   | 0,828 (8)   |
| Na               | 0,9710                  | 0,0845     | 17,7 (1)   | 3,755 (6)   |
| Mg               | 0,9722                  | 0,0811     | 30,4 (8)   | 2,229 (2)   |
| Al               | 0,9754                  | 0,0723     | 16,7 (1)   | 3,418 (7)   |
| Ca [23]          | 0,9833                  | 0,0492     | 21,8       | 4,87        |
| Cd [23]          | 0,9940                  | 0,0178     | 0,0949     | 1,03        |
| Mn [23]          | 0,9878                  | 0,0359     | 1,30       | 1,80        |
| Fe               | 0,9881                  | 0,0353     | 1,22 (1)   | 0,288 (1)   |
| Co [23]          | 0,9887                  | 0,0335     | 0,40       | 0,541       |
| Cu [23]          | 0,9896                  | 0,0309     | 1,30       | 0,552       |
| Zr               | 0,9927                  | 0,0218     | 13,1 (1)   | 1,195 (9)   |
| Nb [23]          | 0,9928                  | 0,0214     | 4,42       | 1,23        |
| Mo [23]          | 0,9931                  | 0,0207     | 2,08       | 0,749       |
| Ag [23]          | 0,9938                  | 0,0184     | 0,508      | 0,953       |
| Pb               | 0,9968                  | 0,0096     | 13,3 (1)   | 0,875 (16)  |
| Bi               | 0,9968                  | 0,0095     | 39,20 (24) | 1,263 (5)   |
| Th               | —                       | 0,0086     | 1,78 (1)   | 0,601 (4)   |
| U                | —                       | 0,0084     | 1,20 (1)   | 0,453 (4)   |
| Pu [23]          | —                       | 0,0083     | 0,0708     | 0,286       |

фузии  $D$ , см, связан с диффузионной постоянной  $D_0$ , см<sup>2</sup>/с, соотношением  $D_0 = Dv$ , где  $v$  — скорость, см/с. Длина диффузии с точностью до числового множителя характеризует среднее расстояние между точкой рождения нейтрона и точкой, в которой он поглощается, т. е.  $\bar{r}^2 = 6L^2$ , где  $r$  — расстояние по прямой от точки возникновения нейтрона до точки его захвата.

Величина  $t_T$  с, определяемая по формуле  $t_T = 1/v\Sigma_a$ , где  $v$  — скорость нейтрона, см/с, называется временем диффузии или временем жизни тепловых нейтронов (табл. 41.14).

Таблица 41.16. Время термализации в некоторых замедлителях [40]

| Замедлитель              | $t_{th} \cdot 10^{-6}$ с |
|--------------------------|--------------------------|
| H <sub>2</sub> O (77 K)  | 55,5 (1,5)               |
| H <sub>2</sub> O (300 K) | 5,8 (0,6)                |
| C                        | 185 (45)                 |
| Be                       | 28                       |
| BeO                      | 67                       |

Значения длины диффузии  $L$ , коэффициента диффузии  $D$ , средней логарифмической потери энергии  $\xi$  и величины  $1-\mu$ , где  $\mu$  — средний косинус угла рассеяния, для ряда элементов приведены в табл. 41.15.

Время термализации  $t_{th}$  (табл. 41.16) определяется как скорость приближения средней энергии нейтронов к равновесной, т. е.

$$\bar{E} - (2/3) kT = \text{const exp } (-t/t_{th}).$$

В экспериментах с импульсными источниками нейтронов постоянная спада асимптотической плотности потока нейтронов связана с диффузионными свойствами среды и геометрическим параметром  $B^2$ , см<sup>-2</sup>, соотношением

$$\lambda_0 = v\Sigma_a + D_0 B^2 - CB^4 + FB^6,$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, см;  $v$  — скорость нейтрона, см/с;  $\Sigma_a$  — макроскопическое сечение поглощения, см<sup>-1</sup>;  $D_0 = Dv$ , см<sup>2</sup>/с;  $C$  — коэффициент диффузионного охлаждения, см<sup>4</sup>/с;  $F$  — числовой коэффициент, см<sup>6</sup>/с.

Значения величин, характеризующих диффузионные свойства замедляющих нейтроны сред, приведены в табл. 41.17.

Таблица 41.17. Диффузионные параметры замедлителей [41]

| Среда (удельная масса, г/см <sup>3</sup> )          | $B^2$ , см <sup>-2</sup> | $\lambda_0$ , с <sup>-1</sup> | $L$ , см        | $D_0$ , 10 <sup>5</sup> см <sup>2</sup> /с | $C$ , 10 <sup>4</sup> см <sup>4</sup> /с<br>[F, см <sup>6</sup> /с] |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| H <sub>2</sub> O                                    | 0,02—0,42                | —                             | 2,80 (3)        | 0,368 (4)                                  | 0,4137 (688)                                                        |
| D <sub>2</sub> O                                    | —                        | —                             | —               | 1,96 (7)                                   | 3,72 (50)                                                           |
| C                                                   | 1,76—18,9                | 74,7 (0,6)                    | 53,8 (3)        | 2,14 (1)                                   | 340 (30)                                                            |
| (1,70)                                              | —                        | —                             | 52,4 (1,4) [42] | 2,086 (21) [42]                            | 390 (25) [42]                                                       |
| (1,64)                                              | —                        | —                             | —               | —                                          | —                                                                   |
| Be                                                  | 3,4—74                   | 277 (8)                       | 20,8 (3)        | 1,235 (13)                                 | 28 (3)                                                              |
| (1,85)                                              | —                        | —                             | 21,8 (3) [42]   | 1,233 (7) [42]                             | 31,3 (8) [42]                                                       |
| (1,79)                                              | —                        | —                             | —               | —                                          | —                                                                   |
| BeO                                                 | —                        | 132 (3)                       | 29,9 (3)        | 1,178 (3)                                  | 38,5 (8)                                                            |
| (2,96)                                              | —                        | —                             | 28,9 (5) [42]   | 1,548 (9) [42]                             | 46,3 (2,4) [42]                                                     |
| (2,79)                                              | —                        | —                             | —               | 10,579 (32)                                | 21,2 (3,5)                                                          |
| Zr [40]                                             | —                        | 3765 (89)                     | —               | —                                          | [5300 (14)]                                                         |
| Бензол [40]                                         | —                        | 2886 (111)                    | —               | 0,4865 (137)                               | 1,387 (385)                                                         |
| Парафин                                             | —                        | 5860 (70)                     | 2,13 (4)        | 0,266 (5)                                  | 0,120 (50)                                                          |
| Полиэтилен                                          | —                        | 5900 (90)                     | 2,12 (3)        | 0,265 (6)                                  | 0,260 (80)                                                          |
| Даутерм А                                           | —                        | 2870 (40)                     | 4,14 (7)        | 0,492 (6)                                  | 1,19 (21)                                                           |
| (дифенил — 26,8%,<br>оксидифенил — 73,2%)           | —                        | —                             | —               | —                                          | —                                                                   |
| Органическое стекло                                 | —                        | 4300                          | —               | 0,34                                       | —                                                                   |
| ZrH <sub>1,7</sub>                                  | 0,03—0,39                | 3757 (98)                     | —               | 0,579 (32)                                 | 21,2 (3,5)<br>50 (14)                                               |
| Люцит                                               | —                        | —                             | 3,14 (3)        | —                                          | —                                                                   |
| Дифенил ( $T = 77^\circ \text{C}$ )                 | 0,0816—0,28              | —                             | 4,82 (7)        | 0,5437 (117)                               | 0,985 (55)                                                          |
| n-Гептан ( $T = 17,5^\circ \text{C}$ )              | 0,11—1,5                 | 4950 (120)                    | 2,59 (6)        | 0,3313 (12)                                | 0,480 (29)                                                          |
| Моноизопропилбифенил<br>( $T = 30^\circ \text{C}$ ) | 0,0945—<br>0,2952        | —                             | —               | 0,3780 (33)                                | 0,125 (43)                                                          |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ENDF-102. Data Formates and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File, ENDF/Revised by D. Garber, C. Dunford, S. Pearlstein. BNL-NCS-50496. Upton, N. Y., 1975.
2. Hawerton R. J., Plechaty E. F., Cullen D. E. The LLL Evaluated Nuclear Data Library (ENDL): Evaluation

Techniques, Graphical Displays and Descriptions of Individual Evaluations. UCRL-50400. Lawrence Livermore Laboratory. 1971. Vol. 4.

3. Parker K. The Aldermaston Nuclear Data Library as at May 1963. AWRE 0-70/63. Atomic Weapons Research Establishments. Aldermaston, England, 1963.

4. Woll D. Card Image Format of the Karlsruhe Evaluated Nuclear Data File KEDAK. Karlsruhe Report KFK

880. Institut für Angewandte Kernphysik Kernforschungszentrum. Karlsruhe, 1968.
5. CINDA 84 (1981—1984). The index to literature and computer files on microscopic neutron data. Published on behalf of USA National Nuclear Data Center, USSR Nuclear Data Centre, NEA Data Bank, IAEA Nuclear Data Section. Vienna. IAEA, 1984.
6. Радиационный захват нейтронов: Справочник/Т. С. Беланова, А. В. Игнатюк, А. Б. Пашенко, В. И. Пляскин. М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Блатт Дж., Вайскопф В. Теоретическая ядерная физика: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
8. Кёртис Л. Введение в нейтронную физику: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1965.
9. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1968.
10. Ситенко А. Г. Теория ядерных реакций: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1983.
11. Александров Ю. А. Фундаментальные свойства нейтронов. — 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1982.
12. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
13. Фейнберг С. М., Шихов С. Б., Троянский В. Б. Теория ядерных реакторов: Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1980. Т. 1: Элементарная теория реакторов.
14. Вычислительные методы в физике реакторов: Сб. статей/Под ред. Х. Гринспена, К. Келбера, Д. Окрента: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1972.
15. Николаев М. Н., Базазянц Н. О. Анизотропия упругого рассеяния нейтронов. М.: Атомиздат, 1972.
16. Анципов Г. В., Коньшин В. А., Суховицкий Е. Ш. Ядерные константы для изотопов плутония. Минск: Наука и техника, 1982.
17. Обозначения, единицы измерений и терминология в физике, документ UIP (1978)//Успехи физ. наук. 1979. Т. 129, вып. 2. С. 289—338.
18. Partical Data Group. Review of Particle Properties//Rev. Mod. Phys. 1984. Vol. 56, N 2. Pt II. P. S122—S123.
19. Neutron Physics. Springer Tracts in Modern Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1977. Vol. 80, N 1.
20. Медведев Ю. А., Степанов Б. М., Труханова Г. Я. Ядерно-физические константы взаимодействия с элементами, входящими в состав атмосферы и земной коры: Справочник: М.: Энергоиздат, 1981.
21. Mughabghab S. F., Divadeenam M., Holden W. E. Neutron Cross Sections. N. Y.: Academic Press, 1981. Vol. 1: Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. P. A., Z=1÷60.
22. Nuclear Wallet Cards/Ed. by V. S. Shirley, C. M. Lederer. N. Y.: NBS, Office of Standard Reference Data, 1979.
23. Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В. Ядерно-физические константы: Справочник. М.: Атомиздат, 1963.
24. Mughabghab S. F., Garder D. I. Neutron Cross Sections. — 3rd ed. National Neutron Cross Section Center. BNL-325. Brookhaven National Laboratory Associated Universities, Inc., 1973. Vol. 1: Resonance Parameters
25. Оцененные нейтронные данные для расчета тепловых реакторов/Л. П. Абагян, М. С. Юдкевич//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. М.: ЦНИИАтоминформ, 1981. Вып. 4(43). С. 24—52.
26. Горбачев В. М., Замятин Ю. С., Лбев А. А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер: Справочник. М.: Атомиздат, 1976.
27. Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements: Technical report series N 227. Vienna: IAEA, 1983.
28. Gryntakis E. M., Kim J. I./J. Radioanal. Chem. 1983. Vol. 76, N 2. P. 341—496.
29. Garber D. I., Kinsey R. R. Neutron Cross Sections. Curvers — 3d. ed. National Neutron Cross Section Center. BNL-325, Brookhaven National Laboratory Associated Universities, Inc., 1976. Vol. 2.
30. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами: Справочник/В. М. Бычков, В. Н. Мапохин, А. Б. Пашенко, В. И. Пляскин. М.: Энергоиздат, 1982.
31. Tsukada K. Table of Nuclear Reactions and Subsequent Radioactive Decays Induced by 14-MeV Neutrons. JAERI 1252. Japan Atomic Energy Research Institute, 1977.
32. Лапенас А. А. Измерение спектров нейтронов активационным методом. Рига: Зинатне, 1975.
33. Ломакин С. С., Петров В. И., Самойлов П. С. Радиометрия нейтронов активационным методом. М.: Энергоатомиздат, 1983.
34. Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С., Тихонов Е. Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.
35. О выборе оптимального набора активационных детекторов для спектрометрии нейтронов в сборках с внешним источником 14-МэВ-нейтронов/Х. И. Бондарс, В. А. Загрядский, В. М. Новиков, Д. Ю. Чувилин. Препринт ИАЭ-3798/4. М., 1983.
36. Handbook of Nuclear Activation Cross Sections: Technical reports series N 156. Vienna: IAEA, 1974.
37. Усачев Л. Н., Бобков Ю. Г. Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. М.: Атомиздат, 1980.
38. Галанин А. Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
39. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Киконна. М.: Атомиздат, 1976.
40. Спектры медленных нейтронов: Сб. статей: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1971.
41. Импульсный метод в нейтронной физике/Под ред. П. Гриблера, Э. Хенли: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1968.
42. Жежерун И. Ф. Экспериментальное изучение некоторых вопросов физики ядерных реакторов с кристаллическими замедлителями: Автореф. дис. .... д-ра физ.-мат. наук., 1974.
43. Barbier M. Induced Radioactivity. Amsterdam — Lond.: North-Holland Publ. Comp., 1969.
44. Handbook on Nuclear Activation Data. Technical report series № 273. Vienna: IAEA, 1987.

## Глава 42

# ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

В. П. Рудаков

### 42.1. ПРОХОЖДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Тяжелые (тяжелее электрона) заряженные частицы, проходя через вещество, теряют энергию главным образом на ионизацию и возбуждение атомов вещества. Характеристикой потери энергии является удельная потеря энергии  $dE/dx$ , МэВ/см, или  $(1\rho) dE/dx$ , МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), где  $\rho$  — плотность вещества, мг/см<sup>3</sup>. Удельные потери энергии называют также тормозной способностью вещества.

Тормозную способность вычисляют по формуле Бете:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 Z z^2 n}{m_e v^2} \left[ \ln \frac{2m_e v^2 Q_{\max}}{J^2 (1-\beta^2)} - 2\beta^2 - \delta - U \right],$$

где  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона;  $n$  — число атомов в 1 см<sup>3</sup> вещества и  $Z$  — его атомный номер;  $v$  и  $z$  — скорость и заряд падающей частицы;  $\beta = v/c$  ( $c$  — скорость света);  $J$  — средний потенциал ионизации атома вещества;  $Q_{\max}$  — максимальная энергия, передаваемая частицей атому электрона;  $U$  — поправка, учитывающая энергию связи электронов на  $K$ - и  $L$ -оболочках атомов;  $\delta$  — поправка, связанная с так называемым эффектом плотности. В диапазоне энергии падающих частиц 1—100 МэВ поправками  $U$  и  $\delta$  можно пренебречь.

Пробег  $R$  частицы с начальной энергией  $E$  описывается формулой  $R = \int_0^E \frac{dE}{dE/dx}$ ; единица пробега — см или мг/см<sup>2</sup>.

Поскольку тяжелая заряженная частица с энергией 1—100 МэВ в каждом акте взаимодействия с атомными электронами теряет лишь малую долю своей энергии, пучок моноэнергетических заряженных частиц, проходя через вещество, практически не меняет интенсивность вплоть до конца пробега. Статистические флуктуации потерь энергии приводят лишь к небольшому (1—2%)

разбросу пробегов (стреглингу). Выход тяжелых заряженных частиц из пучка в результате многократного рассеяния оценивается по формулам, приведенным ниже.

Из формулы Бете видно, что тормозная способность какого-либо вещества для данной частицы зависит лишь от заряда и скорости этой частицы. Поэтому, зная, например, пробег протона, можно вычислить пробеги дейтронов и тритонов в этом же веществе по формуле

$$R_m(E) = \frac{m}{m_p} R_p \left( \frac{m_p}{m} E \right),$$

где  $R_p$ ,  $m_p$  и  $\frac{m_p}{m} E$  — пробег, масса и энергия протона соответственно;  $R_m$ ,  $m$  и  $E$  — пробег, масса и энергия дейтрона или тритона. Точно так же, зная пробег  $\alpha$ -частицы, можно по этой формуле вычислить пробеги ионов <sup>3</sup>He<sup>+</sup> и т. д.

Кроме того, зная пробег какой-либо одной частицы с зарядом  $z$  и массой  $m$ , можно приближенно вычислить пробег любой другой частицы с зарядом  $z_1$  и массой  $m_1$  по формуле

$$R_{m_1}(E) = \frac{m_1}{m} \frac{z^2}{z_1^2} R_m \left( \frac{m}{m_1} E \right) F,$$

где  $E$  и  $\frac{m}{m_1} E$  — энергии частиц  $m_1$  и  $m$ ;  $F$  — поправочный множитель, заметно отличающийся от единицы лишь при больших энергиях. Эта формула не учитывает процессов перезарядки при малых энергиях и поэтому справедлива при энергиях выше 5 МэВ.

В табл. 42.1—42.20 приведены значения пробега и тормозной способности для ионов начала периодической системы (от водорода до иона), наиболее часто встречающихся как ускоренные частицы и как продукты ядерных реакций в некоторых веществах. Более полные таблицы пробегов опубликованы в [1—3].

Т а б л и ц а 42.1. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов водорода  $^1\text{H}^+$  [1]

$E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta     | Au                              | U     | $E$ , МэВ    |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|-------|--------------|
| 0,0125                | 0,348 | 0,288 | 0,211 | 0,140 | 0,114 | 0,103 | 0,096 | 0,089 | 0,056 | 0,048  | 0,044                           | 0,038 | 0,0126       |
| 0,0160                | 0,394 | 0,326 | 0,239 | 0,159 | 0,129 | 0,117 | 0,108 | 0,100 | 0,064 | 0,055  | 0,050                           | 0,043 | 0,0161       |
| 0,0200                | 0,441 | 0,364 | 0,267 | 0,178 | 0,144 | 0,131 | 0,121 | 0,112 | 0,071 | 0,061  | 0,056                           | 0,048 | 0,0202       |
| 0,0250                | 0,497 | 0,411 | 0,301 | 0,200 | 0,163 | 0,148 | 0,137 | 0,126 | 0,080 | 0,069  | 0,063                           | 0,054 | 0,0252       |
| 0,0320                | 0,559 | 0,463 | 0,339 | 0,225 | 0,183 | 0,167 | 0,154 | 0,142 | 0,091 | 0,078  | 0,072                           | 0,061 | 0,0322       |
| 0,0400                | 0,611 | 0,509 | 0,371 | 0,248 | 0,202 | 0,184 | 0,170 | 0,157 | 0,100 | 0,086  | 0,079                           | 0,068 | 0,0403       |
| 0,0500                | 0,655 | 0,549 | 0,400 | 0,268 | 0,220 | 0,200 | 0,184 | 0,171 | 0,108 | 0,094  | 0,087                           | 0,075 | 0,0504       |
| 0,0600                | 0,683 | 0,578 | 0,419 | 0,282 | 0,232 | 0,211 | 0,195 | 0,180 | 0,116 | 0,101  | 0,093                           | 0,080 | 0,0605       |
| 0,0700                | 0,699 | 0,598 | 0,430 | 0,292 | 0,241 | 0,219 | 0,202 | 0,188 | 0,121 | 0,105  | 0,098                           | 0,084 | 0,0705       |
| 0,0800                | 0,707 | 0,613 | 0,437 | 0,298 | 0,247 | 0,224 | 0,207 | 0,192 | 0,125 | 0,109  | 0,101                           | 0,087 | 0,0806       |
| 0,0900                | 0,709 | 0,622 | 0,440 | 0,303 | 0,251 | 0,228 | 0,210 | 0,195 | 0,128 | 0,112  | 0,104                           | 0,090 | 0,0907       |
| 0,1000                | 0,706 | 0,628 | 0,440 | 0,305 | 0,253 | 0,230 | 0,211 | 0,198 | 0,130 | 0,114  | 0,106                           | 0,091 | 0,1008       |
| 0,1250                | 0,688 | 0,635 | 0,433 | 0,305 | 0,255 | 0,231 | 0,212 | 0,199 | 0,133 | 0,116  | 0,109                           | 0,094 | 0,1260       |
| 0,1600                | 0,651 | 0,632 | 0,415 | 0,297 | 0,250 | 0,226 | 0,208 | 0,195 | 0,133 | 0,117  | 0,109                           | 0,095 | 0,1612       |
| 0,2000                | 0,605 | 0,614 | 0,391 | 0,284 | 0,240 | 0,218 | 0,200 | 0,187 | 0,130 | 0,114  | 0,107                           | 0,094 | 0,2016       |
| 0,2500                | 0,551 | 0,580 | 0,362 | 0,268 | 0,227 | 0,206 | 0,189 | 0,177 | 0,125 | 0,110  | 0,104                           | 0,090 | 0,2519       |
| 0,3200                | 0,488 | 0,530 | 0,327 | 0,246 | 0,210 | 0,192 | 0,175 | 0,164 | 0,117 | 0,104  | 0,098                           | 0,086 | 0,3225       |
| 0,4000                | 0,431 | 0,478 | 0,295 | 0,225 | 0,193 | 0,177 | 0,161 | 0,151 | 0,110 | 0,098  | 0,092                           | 0,080 | 0,4031       |
| 0,5000                | 0,376 | 0,423 | 0,263 | 0,203 | 0,176 | 0,162 | 0,147 | 0,137 | 0,102 | 0,090  | 0,085                           | 0,075 | 0,5039       |
| 0,6000                | 0,331 | 0,373 | 0,236 | 0,185 | 0,161 | 0,148 | 0,135 | 0,125 | 0,094 | 0,084  | 0,079                           | 0,070 | 0,6047       |
| 0,7000                | 0,298 | 0,334 | 0,216 | 0,170 | 0,149 | 0,137 | 0,124 | 0,116 | 0,088 | 0,078  | 0,074                           | 0,066 | 0,7055       |
| 0,8000                | 0,271 | 0,302 | 0,199 | 0,159 | 0,139 | 0,129 | 0,117 | 0,109 | 0,082 | 0,074  | 0,070                           | 0,062 | 0,8062       |
| 0,9000                | 0,249 | 0,275 | 0,186 | 0,149 | 0,131 | 0,122 | 0,110 | 0,102 | 0,078 | 0,071  | 0,067                           | 0,059 | 0,9070       |
| 1,0000                | 0,231 | 0,253 | 0,174 | 0,141 | 0,124 | 0,115 | 0,104 | 0,097 | 0,075 | 0,067  | 0,064                           | 0,057 | 1,0078       |
| 1,2500                | 0,196 | 0,210 | 0,151 | 0,124 | 0,111 | 0,103 | 0,093 | 0,086 | 0,068 | 0,061  | 0,058                           | 0,052 | 1,2597       |
| 1,6000                | 0,163 | 0,171 | 0,129 | 0,108 | 0,096 | 0,090 | 0,081 | 0,075 | 0,060 | 0,054  | 0,051                           | 0,046 | 1,6125       |
| 2,0000                | 0,138 | 0,144 | 0,111 | 0,094 | 0,084 | 0,079 | 0,071 | 0,066 | 0,053 | 0,049  | 0,046                           | 0,041 | 2,0156       |
| 2,5000                | 0,115 | 0,121 | 0,095 | 0,082 | 0,074 | 0,069 | 0,062 | 0,058 | 0,047 | 0,043  | 0,041                           | 0,037 | 2,5195       |
| 3,2000                | 0,095 | 0,100 | 0,079 | 0,069 | 0,063 | 0,059 | 0,053 | 0,049 | 0,041 | 0,038  | 0,036                           | 0,032 | 3,2250       |
| 4,0000                | 0,079 | 0,084 | 0,067 | 0,059 | 0,054 | 0,051 | 0,046 | 0,043 | 0,036 | 0,033  | 0,031                           | 0,029 | 4,0312       |
| 5,0000                | 0,066 | 0,071 | 0,057 | 0,051 | 0,047 | 0,044 | 0,040 | 0,037 | 0,031 | 0,029  | 0,028                           | 0,025 | 5,0395       |
| 6,0000                | 0,057 | 0,061 | 0,050 | 0,045 | 0,041 | 0,039 | 0,035 | 0,032 | 0,028 | 0,026  | 0,025                           | 0,023 | 6,0468       |
| 7,0000                | 0,050 | 0,054 | 0,044 | 0,040 | 0,037 | 0,035 | 0,032 | 0,029 | 0,025 | 0,023  | 0,022                           | 0,021 | 7,0546       |
| 8,0000                | 0,045 | 0,049 | 0,040 | 0,036 | 0,034 | 0,032 | 0,029 | 0,027 | 0,023 | 0,021  | 0,021                           | 0,019 | 8,0624       |
| 9,0000                | 0,044 | 0,045 | 0,037 | 0,033 | 0,031 | 0,029 | 0,027 | 0,025 | 0,022 | 0,020  | 0,019                           | 0,018 | 9,0702       |
| 10,0000               | 0,038 | 0,041 | 0,034 | 0,031 | 0,029 | 0,027 | 0,025 | 0,023 | 0,020 | 0,019  | 0,018                           | 0,017 | 10,078       |
| 11,0000               | 0,035 | 0,038 | 0,032 | 0,029 | 0,027 | 0,025 | 0,023 | 0,022 | 0,019 | 0,018  | 0,017                           | 0,016 | 11,086       |
| 12,0000               | 0,033 | 0,036 | 0,030 | 0,027 | 0,025 | 0,024 | 0,022 | 0,020 | 0,018 | 0,017  | 0,016                           | 0,015 | 12,094       |
| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H     | He    | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода  | $E$ ,<br>МэВ |
| 0,0125                | 0,792 | 0,338 | 0,224 | 0,210 | 0,187 | 0,123 | 0,076 | 0,054 | 0,035 | 0,283  | 0,360                           | 0,275 | 0,0126       |
| 0,0160                | 0,879 | 0,371 | 0,249 | 0,234 | 0,208 | 0,141 | 0,087 | 0,062 | 0,041 | 0,318  | 0,405                           | 0,306 | 0,0161       |
| 0,0200                | 0,956 | 0,392 | 0,272 | 0,256 | 0,229 | 0,159 | 0,099 | 0,072 | 0,048 | 0,353  | 0,449                           | 0,333 | 0,0202       |
| 0,0250                | 1,048 | 0,416 | 0,299 | 0,282 | 0,255 | 0,183 | 0,117 | 0,085 | 0,062 | 0,394  | 0,502                           | 0,367 | 0,0252       |
| 0,0320                | 1,156 | 0,439 | 0,325 | 0,309 | 0,283 | 0,212 | 0,138 | 0,104 | 0,072 | 0,441  | 0,562                           | 0,403 | 0,0322       |
| 0,0400                | 1,244 | 0,452 | 0,347 | 0,334 | 0,307 | 0,240 | 0,159 | 0,122 | 0,087 | 0,481  | 0,614                           | 0,435 | 0,0403       |
| 0,0500                | 1,329 | 0,466 | 0,368 | 0,358 | 0,333 | 0,268 | 0,181 | 0,141 | 0,102 | 0,518  | 0,660                           | 0,465 | 0,0504       |
| 0,0600                | 1,399 | 0,479 | 0,388 | 0,375 | 0,355 | 0,292 | 0,198 | 0,156 | 0,115 | 0,545  | 0,696                           | 0,489 | 0,0605       |
| 0,0700                | 1,459 | 0,494 | 0,405 | 0,393 | 0,373 | 0,311 | 0,212 | 0,168 | 0,124 | 0,566  | 0,721                           | 0,511 | 0,0705       |
| 0,0800                | 1,516 | 0,509 | 0,420 | 0,408 | 0,388 | 0,326 | 0,224 | 0,178 | 0,132 | 0,582  | 0,742                           | 0,531 | 0,0806       |
| 0,0900                | 1,561 | 0,524 | 0,433 | 0,422 | 0,402 | 0,339 | 0,233 | 0,186 | 0,138 | 0,595  | 0,756                           | 0,549 | 0,0907       |
| 0,1000                | 1,610 | 0,540 | 0,448 | 0,434 | 0,413 | 0,350 | 0,242 | 0,192 | 0,143 | 0,604  | 0,768                           | 0,565 | 0,1008       |
| 0,1250                | 1,719 | 0,574 | 0,474 | 0,457 | 0,436 | 0,368 | 0,254 | 0,202 | 0,150 | 0,621  | 0,790                           | 0,597 | 0,1260       |
| 0,1600                | 1,837 | 0,613 | 0,503 | 0,484 | 0,460 | 0,383 | 0,263 | 0,209 | 0,155 | 0,633  | 0,805                           | 0,635 | 0,1612       |
| 0,2000                | 1,919 | 0,637 | 0,522 | 0,501 | 0,474 | 0,385 | 0,262 | 0,208 | 0,154 | 0,631  | 0,800                           | 0,658 | 0,2016       |
| 0,2500                | 1,962 | 0,649 | 0,527 | 0,507 | 0,473 | 0,374 | 0,253 | 0,198 | 0,146 | 0,613  | 0,777                           | 0,669 | 0,2519       |
| 0,3200                | 1,943 | 0,634 | 0,516 | 0,492 | 0,450 | 0,345 | 0,230 | 0,180 | 0,131 | 0,576  | 0,732                           | 0,654 | 0,3225       |
| 0,4000                | 1,839 | 0,607 | 0,482 | 0,458 | 0,415 | 0,310 | 0,205 | 0,159 | 0,116 | 0,528  | 0,673                           | 0,612 | 0,4031       |
| 0,5000                | 1,678 | 0,558 | 0,433 | 0,412 | 0,369 | 0,271 | 0,179 | 0,140 | 0,102 | 0,472  | 0,602                           | 0,553 | 0,5039       |
| 0,6000                | 1,501 | 0,503 | 0,381 | 0,362 | 0,324 | 0,237 | 0,157 | 0,122 | 0,090 | 0,416  | 0,534                           | 0,488 | 0,6047       |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | H     | He    | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода  | $C_2$ ,<br>МэВ |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|-------|----------------|
| 0,7000                  | 1,325 | 0,455 | 0,335 | 0,318 | 0,285 | 0,208 | 0,139 | 0,108 | 0,080 | 0,370  | 0,475      | 0,430 | 0,7055         |
| 0,8000                  | 1,169 | 0,410 | 0,297 | 0,283 | 0,253 | 0,185 | 0,125 | 0,098 | 0,073 | 0,331  | 0,426      | 0,381 | 0,8062         |
| 0,9000                  | 1,039 | 0,370 | 0,265 | 0,253 | 0,225 | 0,166 | 0,113 | 0,089 | 0,066 | 0,300  | 0,384      | 0,340 | 0,9070         |
| 1,0000                  | 0,938 | 0,339 | 0,242 | 0,230 | 0,205 | 0,152 | 0,104 | 0,083 | 0,062 | 0,274  | 0,351      | 0,308 | 1,0078         |
| 1,2500                  | 0,753 | 0,282 | 0,201 | 0,192 | 0,170 | 0,128 | 0,090 | 0,072 | 0,055 | 0,227  | 0,288      | 0,254 | 1,2597         |
| 1,6000                  | 0,583 | 0,228 | 0,165 | 0,158 | 0,141 | 0,108 | 0,077 | 0,063 | 0,049 | 0,184  | 0,230      | 0,205 | 1,6125         |
| 2,0000                  | 0,460 | 0,188 | 0,140 | 0,133 | 0,120 | 0,093 | 0,068 | 0,056 | 0,044 | 0,153  | 0,189      | 0,169 | 2,0156         |
| 2,5000                  | 0,359 | 0,154 | 0,118 | 0,112 | 0,103 | 0,082 | 0,061 | 0,051 | 0,040 | 0,128  | 0,155      | 0,140 | 2,5195         |
| 3,2000                  | 0,278 | 0,124 | 0,098 | 0,094 | 0,087 | 0,070 | 0,053 | 0,045 | 0,036 | 0,105  | 0,125      | 0,114 | 3,2250         |
| 4,0000                  | 0,223 | 0,101 | 0,082 | 0,079 | 0,074 | 0,061 | 0,047 | 0,039 | 0,032 | 0,088  | 0,104      | 0,095 | 4,0312         |
| 5,0000                  | 0,182 | 0,083 | 0,069 | 0,067 | 0,063 | 0,052 | 0,040 | 0,034 | 0,028 | 0,074  | 0,087      | 0,079 | 5,0390         |
| 6,0000                  | 0,155 | 0,071 | 0,060 | 0,058 | 0,055 | 0,046 | 0,036 | 0,030 | 0,025 | 0,064  | 0,075      | 0,069 | 6,0468         |
| 7,0000                  | 0,137 | 0,062 | 0,053 | 0,051 | 0,049 | 0,041 | 0,032 | 0,027 | 0,023 | 0,057  | 0,066      | 0,061 | 7,0546         |
| 8,0000                  | 0,122 | 0,055 | 0,048 | 0,046 | 0,044 | 0,037 | 0,029 | 0,025 | 0,021 | 0,051  | 0,060      | 0,055 | 8,0624         |
| 9,0000                  | 0,111 | 0,050 | 0,044 | 0,042 | 0,040 | 0,034 | 0,027 | 0,023 | 0,019 | 0,047  | 0,054      | 0,050 | 9,0702         |
| 10,0000                 | 0,102 | 0,046 | 0,040 | 0,039 | 0,037 | 0,031 | 0,025 | 0,021 | 0,018 | 0,043  | 0,050      | 0,046 | 10,078         |
| 11,0000                 | 0,094 | 0,043 | 0,038 | 0,036 | 0,034 | 0,029 | 0,023 | 0,020 | 0,017 | 0,040  | 0,046      | 0,043 | 11,086         |
| 12,0000                 | 0,087 | 0,040 | 0,035 | 0,034 | 0,032 | 0,027 | 0,022 | 0,019 | 0,016 | 0,037  | 0,043      | 0,040 | 12,094         |

Таблица 42.2. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов водорода  $^1H^+$  в различных веществах [1] $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | Be      | C       | Al      | Ti      | Ni      | Ge      | Zr      | Ag      | Eu      | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,0125                  | 0,059   | 0,070   | 0,102   | 0,158   | 0,193   | 0,216   | 0,231   | 0,246   | 0,373   | 0,421   | 0,449   | 0,491   | 0,0126    |
| 0,0160                  | 0,068   | 0,082   | 0,118   | 0,181   | 0,222   | 0,247   | 0,265   | 0,283   | 0,430   | 0,488   | 0,521   | 0,575   | 0,0161    |
| 0,0200                  | 0,078   | 0,093   | 0,134   | 0,205   | 0,251   | 0,279   | 0,300   | 0,320   | 0,489   | 0,556   | 0,595   | 0,661   | 0,0202    |
| 0,0250                  | 0,089   | 0,106   | 0,151   | 0,231   | 0,283   | 0,315   | 0,338   | 0,362   | 0,554   | 0,632   | 0,678   | 0,757   | 0,0252    |
| 0,0320                  | 0,102   | 0,122   | 0,173   | 0,264   | 0,323   | 0,360   | 0,386   | 0,414   | 0,635   | 0,727   | 0,781   | 0,877   | 0,0322    |
| 0,0400                  | 0,116   | 0,139   | 0,196   | 0,298   | 0,365   | 0,406   | 0,436   | 0,468   | 0,719   | 0,824   | 0,886   | 0,999   | 0,0403    |
| 0,0500                  | 0,132   | 0,158   | 0,222   | 0,337   | 0,413   | 0,458   | 0,493   | 0,529   | 0,815   | 0,935   | 1,006   | 1,139   | 0,0504    |
| 0,0600                  | 0,147   | 0,175   | 0,246   | 0,374   | 0,458   | 0,507   | 0,546   | 0,586   | 0,905   | 1,038   | 1,117   | 1,268   | 0,0605    |
| 0,0700                  | 0,161   | 0,193   | 0,270   | 0,409   | 0,500   | 0,554   | 0,597   | 0,641   | 0,990   | 1,136   | 1,223   | 1,391   | 0,0705    |
| 0,0800                  | 0,175   | 0,209   | 0,293   | 0,443   | 0,541   | 0,600   | 0,646   | 0,694   | 1,072   | 1,230   | 1,324   | 1,509   | 0,0806    |
| 0,0900                  | 0,190   | 0,226   | 0,316   | 0,476   | 0,582   | 0,644   | 0,694   | 0,746   | 1,152   | 1,321   | 1,423   | 1,623   | 0,0907    |
| 0,1000                  | 0,204   | 0,242   | 0,339   | 0,510   | 0,622   | 0,688   | 0,742   | 0,797   | 1,230   | 1,410   | 1,519   | 1,734   | 0,1008    |
| 0,1250                  | 0,240   | 0,281   | 0,397   | 0,592   | 0,721   | 0,798   | 0,861   | 0,924   | 1,421   | 1,629   | 1,754   | 2,006   | 0,1260    |
| 0,1600                  | 0,293   | 0,337   | 0,480   | 0,709   | 0,861   | 0,952   | 1,029   | 1,103   | 1,686   | 1,931   | 2,077   | 2,378   | 0,1612    |
| 0,2000                  | 0,357   | 0,402   | 0,580   | 0,848   | 1,025   | 1,133   | 1,227   | 1,314   | 1,993   | 2,280   | 2,448   | 2,804   | 0,2016    |
| 0,2500                  | 0,444   | 0,486   | 0,714   | 1,031   | 1,241   | 1,371   | 1,486   | 1,591   | 2,389   | 2,728   | 2,926   | 3,351   | 0,2519    |
| 0,3200                  | 0,580   | 0,614   | 0,919   | 1,306   | 1,564   | 1,726   | 1,874   | 2,006   | 2,973   | 3,387   | 3,628   | 4,151   | 0,3225    |
| 0,4000                  | 0,756   | 0,774   | 1,179   | 1,649   | 1,964   | 2,164   | 2,355   | 2,520   | 3,685   | 4,188   | 4,481   | 5,122   | 0,4031    |
| 0,5000                  | 1,007   | 0,998   | 1,542   | 2,122   | 2,511   | 2,761   | 3,010   | 3,222   | 4,642   | 5,262   | 5,624   | 6,422   | 0,5039    |
| 0,6000                  | 1,293   | 1,253   | 1,947   | 2,642   | 3,110   | 3,412   | 3,727   | 3,992   | 5,676   | 6,421   | 6,855   | 7,814   | 0,6047    |
| 0,7000                  | 1,615   | 1,539   | 2,394   | 3,210   | 3,761   | 4,119   | 4,506   | 4,828   | 6,789   | 7,666   | 8,174   | 9,301   | 0,7055    |
| 0,8000                  | 1,971   | 1,857   | 2,881   | 3,824   | 4,461   | 4,877   | 5,344   | 5,726   | 7,976   | 8,990   | 9,577   | 10,881  | 0,8062    |
| 0,9000                  | 2,359   | 2,207   | 3,405   | 4,480   | 5,207   | 5,682   | 6,235   | 6,684   | 9,230   | 10,385  | 11,054  | 12,541  | 0,9070    |
| 1,0000                  | 2,780   | 2,589   | 3,967   | 5,177   | 5,997   | 6,533   | 7,178   | 7,697   | 10,546  | 11,848  | 12,602  | 14,275  | 1,0078    |
| 1,2500                  | 3,967   | 3,685   | 5,524   | 7,088   | 8,153   | 8,851   | 9,746   | 10,461  | 14,095  | 15,789  | 16,769  | 18,935  | 1,2597    |
| 1,6000                  | 5,944   | 5,552   | 8,056   | 10,148  | 11,584  | 12,529  | 13,827  | 14,869  | 19,647  | 21,933  | 23,269  | 26,189  | 1,6125    |
| 2,0000                  | 8,643   | 8,132   | 11,435  | 14,165  | 16,068  | 17,317  | 19,155  | 20,629  | 26,796  | 29,798  | 31,589  | 35,443  | 2,0156    |
| 2,5000                  | 12,661  | 11,975  | 16,361  | 19,938  | 22,471  | 24,137  | 26,772  | 28,843  | 36,865  | 40,850  | 43,256  | 48,349  | 2,5195    |
| 3,2000                  | 19,456  | 18,433  | 24,518  | 29,373  | 32,867  | 35,196  | 39,120  | 42,169  | 52,948  | 58,480  | 61,830  | 68,810  | 3,2250    |
| 4,0000                  | 28,827  | 27,268  | 35,569  | 42,008  | 46,704  | 49,898  | 55,475  | 59,875  | 74,010  | 81,494  | 86,028  | 95,428  | 4,0312    |
| 5,0000                  | 42,846  | 40,387  | 51,855  | 60,461  | 66,794  | 71,210  | 79,124  | 85,476  | 104,075 | 114,385 | 120,447 | 133,199 | 5,0390    |
| 6,0000                  | 59,307  | 55,720  | 70,767  | 81,732  | 89,870  | 95,609  | 106,176 | 114,724 | 138,207 | 151,568 | 159,272 | 175,591 | 6,0468    |
| 7,0000                  | 78,125  | 73,180  | 92,199  | 105,704 | 115,830 | 122,961 | 136,444 | 147,441 | 176,200 | 192,816 | 202,300 | 222,377 | 7,0546    |
| 8,0000                  | 99,234  | 92,701  | 116,062 | 132,276 | 144,562 | 153,185 | 169,769 | 183,485 | 217,769 | 237,963 | 249,315 | 273,414 | 8,0624    |
| 9,0000                  | 122,542 | 114,237 | 142,282 | 161,361 | 175,962 | 186,185 | 206,058 | 222,734 | 262,856 | 286,831 | 300,174 | 328,493 | 9,0702    |
| 10,0000                 | 147,989 | 137,754 | 170,795 | 192,866 | 209,966 | 221,870 | 245,277 | 265,037 | 311,387 | 339,290 | 354,688 | 387,461 | 10,078    |
| 11,0000                 | 175,544 | 163,200 | 201,546 | 226,713 | 246,486 | 260,164 | 287,342 | 310,256 | 363,240 | 395,146 | 412,594 | 450,213 | 11,086    |
| 12,0000                 | 205,152 | 190,534 | 234,483 | 262,868 | 285,442 | 300,978 | 332,155 | 358,304 | 418,272 | 454,277 | 473,872 | 516,684 | 12,094    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м | H      | He      | N       | O       | Ne      | Ar      | Kr      | Xe      | Rn      | Майлар  | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода    | E, МэВ |
|------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------|---------|--------|
| 0,0125                 | 0,022  | 0,056   | 0,089   | 0,095   | 0,109   | 0,174   | 0,292   | 0,403   | 0,562   | 0,068   | 0,052                           | 0,067   | 0,0126 |
| 0,0160                 | 0,026  | 0,065   | 0,104   | 0,111   | 0,126   | 0,200   | 0,334   | 0,463   | 0,651   | 0,080   | 0,061                           | 0,079   | 0,0161 |
| 0,0200                 | 0,030  | 0,076   | 0,119   | 0,127   | 0,144   | 0,227   | 0,377   | 0,522   | 0,739   | 0,092   | 0,070                           | 0,091   | 0,0202 |
| 0,0250                 | 0,035  | 0,088   | 0,136   | 0,146   | 0,165   | 0,256   | 0,423   | 0,585   | 0,829   | 0,105   | 0,081                           | 0,105   | 0,0252 |
| 0,0320                 | 0,041  | 0,104   | 0,159   | 0,169   | 0,191   | 0,292   | 0,478   | 0,659   | 0,933   | 0,122   | 0,094                           | 0,123   | 0,0322 |
| 0,0400                 | 0,048  | 0,122   | 0,182   | 0,194   | 0,218   | 0,327   | 0,533   | 0,730   | 1,033   | 0,139   | 0,107                           | 0,142   | 0,0403 |
| 0,0500                 | 0,056  | 0,144   | 0,210   | 0,223   | 0,249   | 0,367   | 0,592   | 0,807   | 1,139   | 0,159   | 0,123                           | 0,164   | 0,0504 |
| 0,0600                 | 0,063  | 0,166   | 0,237   | 0,251   | 0,279   | 0,403   | 0,645   | 0,875   | 1,232   | 0,178   | 0,138                           | 0,185   | 0,0605 |
| 0,0700                 | 0,070  | 0,186   | 0,263   | 0,277   | 0,306   | 0,436   | 0,694   | 0,937   | 1,316   | 0,196   | 0,152                           | 0,206   | 0,0705 |
| 0,0800                 | 0,077  | 0,206   | 0,287   | 0,302   | 0,333   | 0,468   | 0,740   | 0,995   | 1,394   | 0,214   | 0,166                           | 0,225   | 0,0806 |
| 0,0900                 | 0,083  | 0,226   | 0,311   | 0,326   | 0,358   | 0,498   | 0,784   | 1,050   | 1,469   | 0,231   | 0,179                           | 0,244   | 0,0907 |
| 0,1000                 | 0,090  | 0,245   | 0,333   | 0,350   | 0,383   | 0,527   | 0,827   | 1,103   | 1,541   | 0,248   | 0,193                           | 0,262   | 0,1008 |
| 0,1250                 | 0,105  | 0,290   | 0,388   | 0,406   | 0,442   | 0,597   | 0,928   | 1,231   | 1,712   | 0,289   | 0,225                           | 0,305   | 0,1260 |
| 0,1600                 | 0,125  | 0,349   | 0,460   | 0,481   | 0,521   | 0,691   | 1,065   | 1,402   | 1,943   | 0,345   | 0,269                           | 0,362   | 0,1612 |
| 0,2000                 | 0,146  | 0,414   | 0,539   | 0,563   | 0,607   | 0,796   | 1,219   | 1,596   | 2,204   | 0,409   | 0,319                           | 0,424   | 0,2016 |
| 0,2500                 | 0,172  | 0,492   | 0,635   | 0,663   | 0,714   | 0,929   | 1,414   | 1,844   | 2,541   | 0,490   | 0,383                           | 0,500   | 0,2519 |
| 0,3200                 | 0,208  | 0,602   | 0,770   | 0,804   | 0,867   | 1,125   | 1,707   | 2,218   | 3,051   | 0,609   | 0,477                           | 0,607   | 0,3225 |
| 0,4000                 | 0,251  | 0,732   | 0,932   | 0,974   | 1,053   | 1,372   | 2,079   | 2,695   | 3,706   | 0,755   | 0,592                           | 0,735   | 0,4031 |
| 0,5000                 | 0,308  | 0,906   | 1,153   | 1,206   | 1,311   | 1,721   | 2,606   | 3,372   | 4,635   | 0,957   | 0,750                           | 0,908   | 0,5039 |
| 0,6000                 | 0,372  | 1,096   | 1,402   | 1,468   | 1,604   | 2,120   | 3,209   | 4,144   | 5,692   | 1,185   | 0,928                           | 1,103   | 0,6047 |
| 0,7000                 | 0,444  | 1,307   | 1,684   | 1,765   | 1,936   | 2,575   | 3,892   | 5,021   | 6,885   | 1,442   | 1,129                           | 1,323   | 0,7055 |
| 0,8000                 | 0,525  | 1,540   | 2,004   | 2,101   | 2,312   | 3,089   | 4,657   | 6,002   | 8,209   | 1,730   | 1,353                           | 1,572   | 0,8062 |
| 0,9000                 | 0,616  | 1,799   | 2,364   | 2,479   | 2,736   | 3,665   | 5,505   | 7,082   | 9,662   | 2,050   | 1,602                           | 1,852   | 0,9070 |
| 1,0000                 | 0,718  | 2,084   | 2,762   | 2,897   | 3,206   | 4,301   | 6,433   | 8,251   | 11,237  | 2,403   | 1,877                           | 2,164   | 1,0078 |
| 1,2500                 | 1,019  | 2,902   | 3,909   | 4,102   | 4,560   | 6,119   | 9,045   | 11,508  | 15,585  | 3,418   | 2,673                           | 3,067   | 1,2597 |
| 1,6000                 | 1,554  | 4,298   | 5,856   | 6,140   | 6,845   | 9,138   | 13,298  | 16,756  | 22,446  | 5,153   | 4,050                           | 4,620   | 1,6125 |
| 2,0000                 | 2,336  | 6,248   | 8,522   | 8,934   | 9,948   | 13,167  | 18,863  | 23,567  | 31,173  | 7,563   | 5,992                           | 6,792   | 2,0156 |
| 2,5000                 | 3,582  | 9,216   | 12,465  | 13,075  | 14,479  | 18,947  | 26,709  | 33,053  | 43,166  | 11,178  | 8,953                           | 10,083  | 2,5195 |
| 3,2000                 | 5,827  | 14,351  | 19,060  | 19,995  | 21,953  | 28,283  | 39,129  | 47,972  | 61,844  | 17,293  | 14,045                          | 15,702  | 3,2250 |
| 4,0000                 | 9,081  | 21,609  | 28,071  | 29,413  | 32,030  | 40,662  | 55,340  | 67,335  | 85,883  | 25,701  | 21,140                          | 23,481  | 4,0312 |
| 5,0000                 | 14,110 | 32,706  | 41,483  | 43,369  | 46,857  | 58,666  | 78,649  | 94,977  | 119,798 | 38,231  | 31,808                          | 35,137  | 5,0390 |
| 6,0000                 | 20,125 | 45,939  | 57,172  | 59,674  | 64,112  | 79,413  | 105,264 | 126,386 | 157,996 | 52,904  | 44,359                          | 48,838  | 6,0468 |
| 7,0000                 | 27,062 | 61,206  | 75,032  | 78,221  | 83,712  | 102,808 | 135,109 | 161,429 | 200,471 | 69,628  | 58,705                          | 64,477  | 7,0546 |
| 8,0000                 | 34,874 | 78,444  | 94,976  | 88,900  | 105,595 | 128,788 | 168,137 | 200,041 | 247,074 | 88,323  | 74,781                          | 81,953  | 8,0624 |
| 9,0000                 | 43,542 | 97,563  | 116,955 | 121,671 | 129,683 | 157,304 | 204,352 | 242,228 | 297,738 | 108,953 | 92,552                          | 101,233 | 9,0702 |
| 10,0000                | 53,047 | 118,429 | 140,896 | 146,465 | 155,891 | 188,297 | 243,626 | 287,921 | 352,412 | 131,476 | 111,983                         | 122,269 | 10,078 |
| 11,0000                | 63,367 | 140,982 | 166,715 | 173,205 | 184,154 | 221,721 | 285,865 | 337,042 | 411,094 | 155,833 | 133,023                         | 144,996 | 11,086 |
| 12,0000                | 74,495 | 165,192 | 194,371 | 201,846 | 214,428 | 257,523 | 330,985 | 389,490 | 473,713 | 181,985 | 155,646                         | 169,377 | 12,094 |

Таблица 42.3. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов гелия  ${}^4\text{He}^+$  [1] $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Cu    | Ta    | Au    | U     | E, МэВ |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0,0125                 | 0,877 | 0,726 | 0,532 | 0,354 | 0,287 | 0,261 | 0,241 | 0,223 | 0,142 | 0,121 | 0,112 | 0,096 | 0,0500 |
| 0,0160                 | 0,993 | 0,821 | 0,602 | 0,400 | 0,325 | 0,295 | 0,273 | 0,253 | 0,161 | 0,137 | 0,126 | 0,108 | 0,0640 |
| 0,0200                 | 1,110 | 0,918 | 0,673 | 0,447 | 0,363 | 0,330 | 0,305 | 0,282 | 0,180 | 0,154 | 0,141 | 0,121 | 0,0801 |
| 0,0250                 | 1,241 | 1,026 | 0,752 | 0,500 | 0,406 | 0,368 | 0,341 | 0,316 | 0,201 | 0,172 | 0,158 | 0,135 | 0,1001 |
| 0,0320                 | 1,403 | 1,163 | 0,852 | 0,566 | 0,461 | 0,419 | 0,387 | 0,358 | 0,227 | 0,195 | 0,180 | 0,154 | 0,1281 |
| 0,0400                 | 1,554 | 1,294 | 0,945 | 0,631 | 0,514 | 0,469 | 0,432 | 0,400 | 0,254 | 0,219 | 0,201 | 0,173 | 0,1601 |
| 0,0500                 | 1,704 | 1,428 | 1,040 | 0,697 | 0,571 | 0,520 | 0,479 | 0,444 | 0,282 | 0,245 | 0,226 | 0,194 | 0,2001 |
| 0,0600                 | 1,819 | 1,539 | 1,115 | 0,751 | 0,617 | 0,561 | 0,518 | 0,480 | 0,308 | 0,267 | 0,247 | 0,212 | 0,2402 |
| 0,0700                 | 1,906 | 1,631 | 1,173 | 0,795 | 0,657 | 0,596 | 0,551 | 0,511 | 0,328 | 0,287 | 0,266 | 0,229 | 0,2802 |
| 0,0800                 | 1,972 | 1,709 | 1,219 | 0,832 | 0,689 | 0,624 | 0,576 | 0,536 | 0,347 | 0,305 | 0,282 | 0,243 | 0,3202 |
| 0,0900                 | 2,020 | 1,773 | 1,254 | 0,863 | 0,715 | 0,649 | 0,598 | 0,557 | 0,365 | 0,319 | 0,296 | 0,255 | 0,3602 |
| 0,1000                 | 2,054 | 1,827 | 1,280 | 0,887 | 0,737 | 0,668 | 0,614 | 0,575 | 0,379 | 0,332 | 0,307 | 0,265 | 0,4003 |
| 0,1250                 | 2,094 | 1,932 | 1,317 | 0,927 | 0,774 | 0,702 | 0,645 | 0,604 | 0,405 | 0,354 | 0,331 | 0,286 | 0,5003 |
| 0,1600                 | 2,077 | 2,018 | 1,323 | 0,948 | 0,797 | 0,723 | 0,663 | 0,622 | 0,424 | 0,372 | 0,349 | 0,304 | 0,6404 |
| 0,2000                 | 2,010 | 2,040 | 1,299 | 0,944 | 0,799 | 0,723 | 0,664 | 0,622 | 0,431 | 0,380 | 0,357 | 0,312 | 0,8005 |
| 0,2500                 | 1,901 | 1,999 | 1,248 | 0,922 | 0,784 | 0,711 | 0,651 | 0,610 | 0,431 | 0,381 | 0,357 | 0,312 | 1,0007 |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,3200               | 1,745 | 1,896 | 1,170 | 0,881 | 0,752 | 0,686 | 0,626 | 0,585 | 0,419 | 0,372 | 0,349 | 0,307 | 1,2808    |
| 0,4000               | 1,587 | 1,762 | 1,086 | 0,827 | 0,712 | 0,651 | 0,594 | 0,555 | 0,404 | 0,359 | 0,338 | 0,296 | 1,6010    |
| 0,5000               | 1,424 | 1,601 | 0,996 | 0,770 | 0,667 | 0,613 | 0,558 | 0,520 | 0,384 | 0,343 | 0,322 | 0,284 | 2,0013    |
| 0,6000               | 1,268 | 1,428 | 0,904 | 0,708 | 0,617 | 0,568 | 0,515 | 0,480 | 0,359 | 0,321 | 0,302 | 0,269 | 2,4016    |
| 0,7000               | 1,148 | 1,288 | 0,832 | 0,657 | 0,575 | 0,530 | 0,480 | 0,448 | 0,338 | 0,302 | 0,285 | 0,253 | 2,8018    |
| 0,8000               | 1,050 | 1,171 | 0,773 | 0,616 | 0,541 | 0,500 | 0,452 | 0,422 | 0,320 | 0,288 | 0,271 | 0,241 | 3,2021    |
| 0,9000               | 0,972 | 1,074 | 0,724 | 0,581 | 0,512 | 0,475 | 0,429 | 0,399 | 0,306 | 0,275 | 0,260 | 0,232 | 3,6023    |
| 1,0000               | 0,905 | 0,991 | 0,682 | 0,552 | 0,487 | 0,452 | 0,409 | 0,380 | 0,293 | 0,264 | 0,250 | 0,223 | 4,0026    |
| 1,2500               | 0,775 | 0,830 | 0,598 | 0,490 | 0,436 | 0,407 | 0,366 | 0,340 | 0,267 | 0,241 | 0,228 | 0,204 | 5,0033    |
| 1,6000               | 0,649 | 0,680 | 0,512 | 0,428 | 0,382 | 0,357 | 0,322 | 0,297 | 0,238 | 0,216 | 0,204 | 0,183 | 6,4042    |
| 2,0000               | 0,548 | 0,572 | 0,442 | 0,374 | 0,336 | 0,316 | 0,283 | 0,262 | 0,212 | 0,194 | 0,183 | 0,165 | 8,0052    |
| 2,5000               | 0,459 | 0,481 | 0,379 | 0,325 | 0,294 | 0,277 | 0,247 | 0,230 | 0,189 | 0,172 | 0,163 | 0,148 | 10,007    |
| 3,2000               | 0,378 | 0,399 | 0,318 | 0,276 | 0,252 | 0,237 | 0,212 | 0,186 | 0,164 | 0,150 | 0,142 | 0,129 | 12,808    |
| 4,0000               | 0,316 | 0,336 | 0,270 | 0,237 | 0,217 | 0,205 | 0,184 | 0,170 | 0,144 | 0,132 | 0,125 | 0,114 | 16,010    |
| 5,0000               | 0,264 | 0,283 | 0,229 | 0,203 | 0,187 | 0,176 | 0,159 | 0,147 | 0,126 | 0,115 | 0,110 | 0,100 | 20,013    |
| 6,0000               | 0,228 | 0,246 | 0,200 | 0,178 | 0,164 | 0,156 | 0,141 | 0,130 | 0,111 | 0,103 | 0,098 | 0,090 | 24,016    |
| 7,0000               | 0,202 | 0,218 | 0,178 | 0,159 | 0,147 | 0,140 | 0,127 | 0,117 | 0,101 | 0,093 | 0,089 | 0,082 | 28,018    |
| 8,0000               | 0,181 | 0,196 | 0,161 | 0,145 | 0,134 | 0,127 | 0,116 | 0,107 | 0,093 | 0,086 | 0,082 | 0,076 | 32,021    |
| 9,0000               | 0,165 | 0,179 | 0,147 | 0,133 | 0,123 | 0,117 | 0,107 | 0,099 | 0,086 | 0,080 | 0,076 | 0,071 | 36,023    |
| 10,0000              | 0,152 | 0,165 | 0,136 | 0,123 | 0,114 | 0,109 | 0,099 | 0,092 | 0,080 | 0,074 | 0,072 | 0,066 | 40,026    |
| 11,0000              | 0,141 | 0,153 | 0,127 | 0,115 | 0,107 | 0,102 | 0,093 | 0,086 | 0,075 | 0,070 | 0,068 | 0,062 | 44,029    |
| 12,0000              | 0,132 | 0,143 | 0,118 | 0,108 | 0,100 | 0,096 | 0,087 | 0,082 | 0,071 | 0,066 | 0,064 | 0,059 | 48,031    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м | H     | He    | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода  | $E$ , МэВ |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|-------|-----------|
| 0,0125               | 1,994 | 0,851 | 0,564 | 0,530 | 0,471 | 0,311 | 0,190 | 0,135 | 0,089 | 0,713  | 0,907                           | 0,692 | 0,0500    |
| 0,0160               | 2,214 | 0,934 | 0,627 | 0,590 | 0,525 | 0,354 | 0,220 | 0,156 | 0,104 | 0,802  | 1,020                           | 0,771 | 0,0640    |
| 0,0200               | 2,408 | 0,989 | 0,684 | 0,644 | 0,576 | 0,400 | 0,250 | 0,182 | 0,121 | 0,889  | 1,131                           | 0,840 | 0,0801    |
| 0,0250               | 2,617 | 1,038 | 0,746 | 0,703 | 0,636 | 0,456 | 0,292 | 0,213 | 0,154 | 0,985  | 1,254                           | 0,916 | 0,1001    |
| 0,0320               | 2,904 | 1,102 | 0,817 | 0,777 | 0,710 | 0,532 | 0,346 | 0,261 | 0,181 | 1,107  | 1,412                           | 1,013 | 0,1281    |
| 0,0400               | 3,167 | 1,152 | 0,882 | 0,849 | 0,782 | 0,611 | 0,405 | 0,310 | 0,220 | 1,224  | 1,562                           | 1,106 | 0,1601    |
| 0,0500               | 3,442 | 1,211 | 0,956 | 0,930 | 0,865 | 0,698 | 0,470 | 0,366 | 0,265 | 1,346  | 1,716                           | 1,208 | 0,2001    |
| 0,0600               | 3,723 | 1,274 | 1,033 | 0,999 | 0,944 | 0,777 | 0,528 | 0,416 | 0,305 | 1,450  | 1,851                           | 1,302 | 0,2402    |
| 0,0700               | 3,977 | 1,347 | 1,103 | 1,071 | 1,016 | 0,847 | 0,577 | 0,459 | 0,339 | 1,542  | 1,966                           | 1,394 | 0,2802    |
| 0,0800               | 4,229 | 1,420 | 1,171 | 1,138 | 1,084 | 0,910 | 0,624 | 0,497 | 0,369 | 1,623  | 2,068                           | 1,482 | 0,3202    |
| 0,0900               | 4,451 | 1,493 | 1,235 | 1,204 | 1,146 | 0,967 | 0,665 | 0,532 | 0,394 | 1,695  | 2,155                           | 1,565 | 0,3602    |
| 0,1000               | 4,685 | 1,572 | 1,303 | 1,262 | 1,201 | 1,018 | 0,703 | 0,559 | 0,415 | 1,757  | 2,235                           | 1,642 | 0,4003    |
| 0,1250               | 5,227 | 1,745 | 1,442 | 1,389 | 1,327 | 1,121 | 0,772 | 0,615 | 0,457 | 1,888  | 2,403                           | 1,816 | 0,5003    |
| 0,1600               | 5,863 | 1,955 | 1,604 | 1,546 | 1,466 | 1,222 | 0,838 | 0,667 | 0,495 | 2,021  | 2,568                           | 2,025 | 0,6404    |
| 0,2000               | 6,376 | 2,117 | 1,734 | 1,665 | 1,574 | 1,279 | 0,870 | 0,691 | 0,510 | 2,096  | 2,660                           | 2,188 | 0,8005    |
| 0,2500               | 6,764 | 2,239 | 1,816 | 1,748 | 1,632 | 1,290 | 0,872 | 0,684 | 0,503 | 2,114  | 2,679                           | 2,306 | 1,0007    |
| 0,3200               | 6,947 | 2,268 | 1,844 | 1,760 | 1,610 | 1,234 | 0,823 | 0,642 | 0,469 | 2,061  | 2,617                           | 2,337 | 1,2808    |
| 0,4000               | 6,775 | 2,237 | 1,776 | 1,688 | 1,529 | 1,141 | 0,755 | 0,587 | 0,428 | 1,947  | 2,479                           | 2,254 | 1,6010    |
| 0,5000               | 6,355 | 2,112 | 1,640 | 1,561 | 1,396 | 1,027 | 0,677 | 0,529 | 0,385 | 1,786  | 2,280                           | 2,094 | 2,0013    |
| 0,6000               | 5,742 | 1,926 | 1,458 | 1,385 | 1,238 | 0,905 | 0,600 | 0,468 | 0,343 | 1,593  | 2,044                           | 1,869 | 2,4016    |
| 0,7000               | 5,110 | 1,756 | 1,292 | 1,227 | 1,098 | 0,802 | 0,537 | 0,418 | 0,309 | 1,427  | 1,834                           | 1,659 | 2,8018    |
| 0,8000               | 4,540 | 1,593 | 1,152 | 1,098 | 0,982 | 0,718 | 0,486 | 0,379 | 0,282 | 1,287  | 1,652                           | 1,480 | 3,2021    |
| 0,9000               | 4,056 | 1,446 | 1,036 | 0,987 | 0,878 | 0,647 | 0,442 | 0,349 | 0,259 | 1,170  | 1,500                           | 1,328 | 3,6023    |
| 1,0000               | 3,676 | 1,329 | 0,949 | 0,900 | 0,802 | 0,594 | 0,409 | 0,326 | 0,242 | 1,073  | 1,374                           | 1,209 | 4,0026    |
| 1,2500               | 2,971 | 1,113 | 0,792 | 0,756 | 0,672 | 0,504 | 0,354 | 0,286 | 0,216 | 0,895  | 1,137                           | 1,003 | 5,0033    |
| 1,6000               | 2,316 | 0,907 | 0,655 | 0,626 | 0,561 | 0,428 | 0,307 | 0,250 | 0,193 | 0,730  | 0,914                           | 0,814 | 6,4042    |
| 2,0000               | 1,830 | 0,750 | 0,556 | 0,530 | 0,479 | 0,372 | 0,272 | 0,223 | 0,175 | 0,610  | 0,751                           | 0,674 | 8,0052    |
| 2,5000               | 1,432 | 0,616 | 0,470 | 0,447 | 0,413 | 0,327 | 0,242 | 0,202 | 0,161 | 0,510  | 0,617                           | 0,557 | 10,007    |
| 3,2000               | 1,112 | 0,494 | 0,392 | 0,374 | 0,347 | 0,281 | 0,214 | 0,178 | 0,143 | 0,420  | 0,501                           | 0,456 | 12,808    |
| 4,0000               | 0,891 | 0,403 | 0,329 | 0,316 | 0,297 | 0,243 | 0,186 | 0,157 | 0,127 | 0,352  | 0,415                           | 0,380 | 16,010    |
| 5,0000               | 0,728 | 0,331 | 0,277 | 0,266 | 0,251 | 0,208 | 0,162 | 0,137 | 0,112 | 0,296  | 0,347                           | 0,318 | 20,013    |
| 6,0000               | 0,621 | 0,282 | 0,240 | 0,231 | 0,219 | 0,183 | 0,143 | 0,121 | 0,100 | 0,256  | 0,299                           | 0,274 | 24,016    |
| 7,0000               | 0,546 | 0,248 | 0,213 | 0,206 | 0,194 | 0,163 | 0,128 | 0,110 | 0,091 | 0,228  | 0,265                           | 0,243 | 28,018    |
| 8,0000               | 0,489 | 0,221 | 0,192 | 0,186 | 0,175 | 0,148 | 0,116 | 0,100 | 0,083 | 0,205  | 0,238                           | 0,219 | 32,021    |
| 9,0000               | 0,443 | 0,201 | 0,175 | 0,169 | 0,160 | 0,135 | 0,107 | 0,092 | 0,077 | 0,187  | 0,217                           | 0,200 | 36,023    |
| 10,0000              | 0,407 | 0,186 | 0,162 | 0,156 | 0,148 | 0,125 | 0,099 | 0,085 | 0,071 | 0,172  | 0,199                           | 0,184 | 40,026    |
| 11,0000              | 0,376 | 0,172 | 0,151 | 0,146 | 0,138 | 0,116 | 0,092 | 0,079 | 0,066 | 0,160  | 0,185                           | 0,171 | 44,029    |
| 12,0000              | 0,350 | 0,161 | 0,141 | 0,136 | 0,129 | 0,109 | 0,087 | 0,075 | 0,062 | 0,149  | 0,172                           | 0,160 | 48,031    |



Таблица 42.4. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов гелия  $^4_2\text{He}^+$  в различных веществах [1] $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be      | C       | Al      | Ti      | Ni      | Ge      | Zr      | Ag      | Cu      | Ta      | Au                              | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------|---------|-----------|
| 0,0125                | 0,085   | 0,099   | 0,142   | 0,219   | 0,267   | 0,307   | 0,337   | 0,371   | 0,583   | 0,685   | 0,746                           | 0,874   | 0,0500    |
| 0,0160                | 0,100   | 0,117   | 0,166   | 0,255   | 0,310   | 0,356   | 0,390   | 0,428   | 0,673   | 0,790   | 0,860                           | 1,007   | 0,0640    |
| 0,0200                | 0,114   | 0,135   | 0,190   | 0,292   | 0,356   | 0,406   | 0,444   | 0,487   | 0,764   | 0,897   | 0,976                           | 1,143   | 0,0801    |
| 0,0250                | 0,131   | 0,155   | 0,218   | 0,333   | 0,406   | 0,462   | 0,505   | 0,552   | 0,867   | 1,017   | 1,107                           | 1,296   | 0,1001    |
| 0,0320                | 0,152   | 0,180   | 0,252   | 0,385   | 0,470   | 0,532   | 0,580   | 0,634   | 0,996   | 1,167   | 1,269                           | 1,486   | 0,1281    |
| 0,0400                | 0,174   | 0,206   | 0,288   | 0,438   | 0,534   | 0,603   | 0,658   | 0,718   | 1,127   | 1,320   | 1,435                           | 1,679   | 0,1601    |
| 0,0500                | 0,198   | 0,235   | 0,327   | 0,498   | 0,607   | 0,684   | 0,745   | 0,812   | 1,275   | 1,490   | 1,620                           | 1,895   | 0,2001    |
| 0,0600                | 0,221   | 0,262   | 0,365   | 0,553   | 0,674   | 0,758   | 0,825   | 0,898   | 1,410   | 1,645   | 1,788                           | 2,090   | 0,2402    |
| 0,0700                | 0,243   | 0,287   | 0,400   | 0,604   | 0,737   | 0,827   | 0,900   | 0,979   | 1,535   | 1,789   | 1,944                           | 2,271   | 0,2802    |
| 0,0800                | 0,263   | 0,311   | 0,433   | 0,654   | 0,796   | 0,892   | 0,971   | 1,055   | 1,654   | 1,924   | 2,090                           | 2,441   | 0,3202    |
| 0,0900                | 0,283   | 0,334   | 0,465   | 0,701   | 0,853   | 0,955   | 1,039   | 1,128   | 1,766   | 2,053   | 2,229                           | 2,602   | 0,3602    |
| 0,1000                | 0,303   | 0,356   | 0,497   | 0,747   | 0,908   | 1,016   | 1,105   | 1,199   | 1,874   | 2,176   | 2,362                           | 2,756   | 0,4003    |
| 0,1250                | 0,351   | 0,409   | 0,574   | 0,857   | 1,041   | 1,162   | 1,263   | 1,369   | 2,129   | 2,467   | 2,675                           | 3,118   | 0,5003    |
| 0,1600                | 0,418   | 0,480   | 0,680   | 1,006   | 1,218   | 1,358   | 1,477   | 1,597   | 2,466   | 2,852   | 3,086                           | 3,591   | 0,6404    |
| 0,2000                | 0,496   | 0,559   | 0,802   | 1,175   | 1,419   | 1,579   | 1,718   | 1,854   | 2,840   | 3,277   | 3,539                           | 4,110   | 0,8005    |
| 0,2500                | 0,599   | 0,658   | 0,959   | 1,389   | 1,672   | 1,858   | 2,022   | 2,178   | 3,304   | 3,802   | 4,099                           | 4,751   | 1,0007    |
| 0,3200                | 0,752   | 0,802   | 1,191   | 1,700   | 2,036   | 2,259   | 2,461   | 2,647   | 3,964   | 4,547   | 4,892                           | 5,656   | 1,2808    |
| 0,4000                | 0,945   | 0,977   | 1,475   | 2,075   | 2,474   | 2,738   | 2,986   | 3,209   | 4,743   | 5,423   | 5,825                           | 6,718   | 1,6010    |
| 0,5000                | 1,211   | 1,216   | 1,860   | 2,577   | 3,055   | 3,372   | 3,682   | 3,955   | 5,759   | 6,564   | 7,039                           | 8,099   | 2,0013    |
| 0,6000                | 1,510   | 1,481   | 2,283   | 3,120   | 3,680   | 4,052   | 4,430   | 4,758   | 6,838   | 7,773   | 8,323                           | 9,551   | 2,4016    |
| 0,7000                | 1,842   | 1,777   | 2,745   | 3,708   | 4,353   | 4,782   | 5,236   | 5,622   | 7,989   | 9,060   | 9,687                           | 11,088  | 2,8018    |
| 0,8000                | 2,207   | 2,103   | 3,244   | 4,337   | 5,072   | 5,560   | 6,095   | 6,544   | 9,207   | 10,418  | 11,126                          | 12,709  | 3,2021    |
| 0,9000                | 2,604   | 2,460   | 3,779   | 5,006   | 5,833   | 6,381   | 7,004   | 7,521   | 10,485  | 11,842  | 12,633                          | 14,402  | 3,6023    |
| 1,0000                | 3,031   | 2,848   | 4,349   | 5,714   | 5,635   | 7,245   | 7,961   | 8,549   | 11,821  | 13,328  | 14,205                          | 16,164  | 4,0026    |
| 1,2500                | 4,228   | 3,955   | 5,920   | 7,642   | 8,811   | 9,584   | 10,553  | 11,339  | 15,403  | 17,304  | 18,411                          | 20,866  | 5,0033    |
| 1,6000                | 6,211   | 5,826   | 8,460   | 10,711  | 12,251  | 13,272  | 14,645  | 15,759  | 20,971  | 23,466  | 24,929                          | 28,141  | 6,4042    |
| 2,0000                | 8,906   | 8,403   | 11,835  | 14,723  | 16,729  | 18,054  | 19,967  | 21,512  | 28,111  | 31,320  | 33,237                          | 37,383  | 8,0052    |
| 2,5000                | 12,910  | 12,232  | 16,742  | 20,475  | 23,109  | 24,850  | 27,556  | 29,696  | 38,143  | 42,332  | 44,862                          | 50,241  | 10,007    |
| 3,2000                | 19,669  | 18,656  | 24,857  | 29,860  | 33,450  | 35,850  | 39,838  | 42,951  | 54,141  | 59,869  | 63,338                          | 70,594  | 12,808    |
| 4,0000                | 28,981  | 27,434  | 35,838  | 42,415  | 47,199  | 50,459  | 56,090  | 60,545  | 75,070  | 82,738  | 87,383                          | 97,044  | 16,010    |
| 5,0000                | 42,903  | 40,463  | 52,011  | 60,740  | 67,151  | 71,624  | 79,576  | 85,969  | 104,928 | 115,401 | 121,564                         | 134,555 | 20,013    |
| 6,0000                | 59,245  | 55,686  | 70,787  | 81,859  | 90,060  | 95,848  | 106,434 | 115,008 | 138,814 | 152,317 | 160,110                         | 176,642 | 24,016    |
| 7,0000                | 77,926  | 73,019  | 92,063  | 105,656 | 115,831 | 123,000 | 136,481 | 147,486 | 176,530 | 193,264 | 202,825                         | 223,087 | 28,018    |
| 8,0000                | 98,882  | 92,397  | 115,752 | 132,035 | 144,354 | 153,004 | 169,563 | 183,268 | 217,797 | 238,083 | 249,497                         | 273,752 | 32,021    |
| 9,0000                | 122,021 | 113,778 | 141,783 | 160,909 | 175,528 | 185,766 | 205,590 | 222,233 | 262,558 | 286,598 | 299,989                         | 328,433 | 36,023    |
| 10,0000               | 147,287 | 137,127 | 170,092 | 192,190 | 209,289 | 221,197 | 244,530 | 264,234 | 310,742 | 338,683 | 354,114                         | 386,980 | 40,026    |
| 11,0000               | 174,648 | 162,394 | 200,627 | 225,799 | 245,552 | 259,221 | 286,299 | 309,135 | 362,231 | 394,145 | 411,613                         | 449,291 | 44,029    |
| 12,0000               | 204,051 | 189,540 | 233,337 | 261,704 | 284,239 | 299,753 | 330,801 | 356,851 | 416,882 | 452,868 | 472,467                         | 515,303 | 48,031    |
| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H       | He      | N       | O       | Ne      | Ar      | Kr      | Xe      | Rn      | Майлар  | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода    | $E$ , МэВ |
| 0,0125                | 0,032   | 0,081   | 0,123   | 0,132   | 0,149   | 0,237   | 0,409   | 0,596   | 0,917   | 0,097   | 0,075                           | 0,095   | 0,0500    |
| 0,0160                | 0,038   | 0,097   | 0,146   | 0,156   | 0,176   | 0,277   | 0,474   | 0,688   | 1,056   | 0,115   | 0,089                           | 0,113   | 0,0640    |
| 0,0200                | 0,045   | 0,113   | 0,170   | 0,181   | 0,204   | 0,318   | 0,540   | 0,780   | 1,194   | 0,133   | 0,103                           | 0,133   | 0,0801    |
| 0,0250                | 0,053   | 0,132   | 0,197   | 0,210   | 0,236   | 0,364   | 0,613   | 0,879   | 1,337   | 0,154   | 0,120                           | 0,155   | 0,1001    |
| 0,0320                | 0,062   | 0,158   | 0,232   | 0,247   | 0,277   | 0,420   | 0,699   | 0,996   | 1,501   | 0,180   | 0,140                           | 0,183   | 0,1281    |
| 0,0400                | 0,073   | 0,186   | 0,269   | 0,286   | 0,319   | 0,475   | 0,783   | 1,107   | 1,659   | 0,207   | 0,162                           | 0,213   | 0,1601    |
| 0,0500                | 0,085   | 0,219   | 0,312   | 0,330   | 0,367   | 0,536   | 0,874   | 1,225   | 1,822   | 0,238   | 0,186                           | 0,247   | 0,2001    |
| 0,0600                | 0,096   | 0,251   | 0,352   | 0,371   | 0,411   | 0,590   | 0,954   | 1,327   | 1,963   | 0,267   | 0,208                           | 0,279   | 0,2402    |
| 0,0700                | 0,106   | 0,282   | 0,390   | 0,410   | 0,452   | 0,639   | 1,027   | 1,419   | 2,087   | 0,294   | 0,229                           | 0,309   | 0,2802    |
| 0,0800                | 0,116   | 0,311   | 0,425   | 0,446   | 0,490   | 0,685   | 1,093   | 1,503   | 2,200   | 0,319   | 0,249                           | 0,336   | 0,3202    |
| 0,0900                | 0,125   | 0,338   | 0,458   | 0,480   | 0,526   | 0,727   | 1,156   | 1,580   | 2,305   | 0,343   | 0,268                           | 0,363   | 0,3602    |
| 0,1000                | 0,134   | 0,364   | 0,490   | 0,513   | 0,560   | 0,768   | 1,214   | 1,654   | 2,404   | 0,366   | 0,286                           | 0,388   | 0,4003    |
| 0,1250                | 0,154   | 0,425   | 0,563   | 0,588   | 0,639   | 0,861   | 1,350   | 1,824   | 2,633   | 0,421   | 0,329                           | 0,445   | 0,5003    |
| 0,1600                | 0,179   | 0,500   | 0,654   | 0,684   | 0,739   | 0,981   | 1,523   | 2,042   | 2,927   | 0,493   | 0,386                           | 0,518   | 0,6404    |
| 0,2000                | 0,206   | 0,579   | 0,750   | 0,783   | 0,844   | 1,109   | 1,711   | 2,278   | 3,245   | 0,570   | 0,447                           | 0,594   | 0,8005    |
| 0,2500                | 0,236   | 0,671   | 0,863   | 0,900   | 0,969   | 1,264   | 1,940   | 2,569   | 3,640   | 0,665   | 0,522                           | 0,683   | 1,0007    |
| 0,3200                | 0,277   | 0,795   | 1,016   | 1,060   | 1,142   | 1,486   | 2,271   | 2,991   | 4,217   | 0,799   | 0,627                           | 0,804   | 1,2808    |
| 0,4000                | 0,323   | 0,937   | 1,193   | 1,246   | 1,346   | 1,756   | 2,677   | 3,513   | 4,932   | 0,959   | 0,753                           | 0,943   | 1,6010    |
| 0,5000                | 0,385   | 1,121   | 1,428   | 1,493   | 1,620   | 2,126   | 3,238   | 4,232   | 5,919   | 1,174   | 0,922                           | 1,128   | 2,0013    |
| 0,6000                | 0,451   | 1,320   | 1,687   | 1,765   | 1,925   | 2,542   | 3,867   | 5,038   | 7,022   | 1,412   | 1,107                           | 1,330   | 2,4016    |
| 0,7000                | 0,525   | 1,538   | 1,979   | 2,073   | 2,269   | 3,013   | 4,573   | 5,944   | 8,255   | 1,678   | 1,314                           | 1,558   | 2,8018    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м | H      | He      | N       | O       | Ne      | Ar      | Kr      | Xe      | Rn      | Майлар  | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода    | $E$ , МэВ |
|----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------|---------|-----------|
| 0,8000               | 0,608  | 1,778   | 2,308   | 2,418   | 2,655   | 3,541   | 5,357   | 6,951   | 9,614   | 1,973   | 1,545                           | 1,814   | 3,2021    |
| 0,9000               | 0,701  | 2,042   | 2,674   | 2,803   | 3,087   | 4,128   | 6,222   | 8,052   | 11,096  | 2,300   | 1,799                           | 2,099   | 3,6023    |
| 1,0000               | 0,805  | 2,331   | 3,079   | 3,227   | 3,564   | 4,774   | 7,164   | 9,239   | 12,695  | 2,658   | 2,078                           | 2,416   | 4,0026    |
| 1,2500               | 1,109  | 3,156   | 4,236   | 4,444   | 4,931   | 6,608   | 9,801   | 12,526  | 17,083  | 3,682   | 2,881                           | 3,328   | 5,0033    |
| 1,6000               | 1,645  | 4,556   | 6,189   | 6,487   | 7,222   | 9,636   | 14,065  | 17,789  | 23,963  | 5,422   | 4,262                           | 4,885   | 6,4042    |
| 2,0000               | 2,426  | 6,504   | 8,851   | 9,277   | 10,321  | 13,660  | 19,623  | 24,590  | 32,679  | 7,829   | 6,201                           | 7,054   | 8,0052    |
| 2,5000               | 3,668  | 9,461   | 12,779  | 13,403  | 14,836  | 19,419  | 27,441  | 34,042  | 44,628  | 11,431  | 9,151                           | 10,333  | 10,007    |
| 3,0000               | 5,900  | 14,568  | 19,340  | 20,286  | 22,270  | 28,705  | 39,795  | 48,882  | 63,208  | 17,513  | 14,216                          | 15,922  | 12,808    |
| 4,0000               | 9,134  | 21,781  | 28,294  | 29,645  | 32,283  | 41,006  | 55,903  | 68,123  | 87,095  | 25,868  | 21,267                          | 23,652  | 16,010    |
| 5,0000               | 14,129 | 32,801  | 41,613  | 43,505  | 47,007  | 58,885  | 79,051  | 95,574  | 120,776 | 38,311  | 31,861                          | 35,228  | 20,013    |
| 6,0000               | 20,100 | 45,939  | 57,189  | 59,692  | 64,139  | 79,483  | 105,475 | 126,758 | 158,699 | 52,879  | 44,322                          | 48,830  | 24,016    |
| 7,0000               | 26,987 | 61,095  | 74,919  | 78,105  | 83,596  | 102,708 | 135,103 | 161,546 | 200,864 | 69,481  | 58,564                          | 64,355  | 28,018    |
| 8,0000               | 34,742 | 78,207  | 94,718  | 98,633  | 105,319 | 128,499 | 167,891 | 199,876 | 247,128 | 88,040  | 74,522                          | 81,703  | 32,021    |
| 9,0000               | 43,347 | 97,188  | 116,539 | 121,239 | 129,234 | 156,809 | 203,844 | 241,758 | 297,426 | 108,521 | 92,165                          | 100,844 | 36,023    |
| 10,0000              | 52,785 | 117,905 | 140,308 | 145,857 | 155,254 | 187,581 | 242,838 | 287,126 | 351,710 | 130,883 | 111,457                         | 121,730 | 40,026    |
| 11,0000              | 63,031 | 140,299 | 165,946 | 172,408 | 183,319 | 220,770 | 284,780 | 335,901 | 409,980 | 155,069 | 132,350                         | 144,298 | 44,029    |
| 12,0000              | 74,083 | 164,342 | 193,410 | 200,852 | 213,383 | 256,324 | 329,587 | 387,987 | 472,165 | 181,040 | 154,816                         | 168,510 | 48,031    |

Таблица 42.5. Тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов лития  ${}^7\text{Li}^+$  [1]  
 $E_m$  — энергия на единицу массы налетающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Cu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125               | 1,355 | 1,121 | 0,821 | 0,546 | 0,444 | 0,402 | 0,373 | 0,345 | 0,219 | 0,188 | 0,172 | 0,148 | 0,0877    |
| 0,0160               | 1,533 | 1,268 | 0,929 | 0,618 | 0,502 | 0,455 | 0,422 | 0,390 | 0,248 | 0,212 | 0,195 | 0,167 | 0,1123    |
| 0,0200               | 1,714 | 1,418 | 1,039 | 0,691 | 0,561 | 0,509 | 0,472 | 0,436 | 0,277 | 0,237 | 0,218 | 0,187 | 0,1403    |
| 0,0250               | 1,917 | 1,586 | 1,162 | 0,772 | 0,627 | 0,569 | 0,527 | 0,488 | 0,310 | 0,265 | 0,245 | 0,209 | 0,1754    |
| 0,0320               | 2,167 | 1,796 | 1,315 | 0,874 | 0,711 | 0,647 | 0,597 | 0,552 | 0,351 | 0,301 | 0,277 | 0,238 | 0,2245    |
| 0,0400               | 2,407 | 2,004 | 1,464 | 0,976 | 0,796 | 0,726 | 0,669 | 0,619 | 0,394 | 0,339 | 0,312 | 0,268 | 0,2806    |
| 0,0500               | 2,654 | 2,224 | 1,620 | 1,085 | 0,889 | 0,810 | 0,747 | 0,692 | 0,439 | 0,382 | 0,352 | 0,302 | 0,3508    |
| 0,0600               | 2,854 | 2,415 | 1,749 | 1,179 | 0,969 | 0,880 | 0,813 | 0,754 | 0,483 | 0,420 | 0,387 | 0,333 | 0,4210    |
| 0,0700               | 3,015 | 2,579 | 1,856 | 1,258 | 1,039 | 0,943 | 0,872 | 0,809 | 0,520 | 0,455 | 0,421 | 0,362 | 0,4911    |
| 0,0800               | 3,144 | 2,724 | 1,943 | 1,327 | 1,098 | 0,995 | 0,919 | 0,855 | 0,554 | 0,486 | 0,449 | 0,387 | 0,5613    |
| 0,0900               | 3,244 | 2,847 | 2,014 | 1,385 | 1,148 | 1,043 | 0,960 | 0,894 | 0,586 | 0,512 | 0,475 | 0,410 | 0,6314    |
| 0,1000               | 3,322 | 2,954 | 2,070 | 1,435 | 1,192 | 1,081 | 0,994 | 0,929 | 0,613 | 0,536 | 0,497 | 0,428 | 0,7016    |
| 0,1250               | 3,437 | 3,171 | 2,162 | 1,522 | 1,271 | 1,152 | 1,059 | 0,992 | 0,665 | 0,581 | 0,544 | 0,470 | 0,8770    |
| 0,1600               | 3,467 | 3,370 | 2,210 | 1,582 | 1,330 | 1,206 | 1,107 | 1,038 | 0,707 | 0,621 | 0,582 | 0,508 | 1,1226    |
| 0,2000               | 3,412 | 3,463 | 2,204 | 1,602 | 1,355 | 1,228 | 1,126 | 1,056 | 0,732 | 0,646 | 0,606 | 0,529 | 1,4032    |
| 0,2500               | 3,290 | 3,460 | 2,160 | 1,596 | 1,356 | 1,231 | 1,128 | 1,056 | 0,745 | 0,659 | 0,618 | 0,540 | 1,7540    |
| 0,3200               | 3,103 | 3,371 | 2,080 | 1,566 | 1,337 | 1,221 | 1,113 | 1,040 | 0,745 | 0,661 | 0,621 | 0,546 | 2,2451    |
| 0,4000               | 2,908 | 3,229 | 1,989 | 1,516 | 1,305 | 1,194 | 1,088 | 1,017 | 0,740 | 0,658 | 0,619 | 0,543 | 2,8064    |
| 0,5000               | 2,703 | 3,037 | 1,890 | 1,461 | 1,266 | 1,162 | 1,058 | 0,987 | 0,730 | 0,650 | 0,611 | 0,539 | 3,5080    |
| 0,6000               | 2,497 | 2,812 | 1,781 | 1,395 | 1,215 | 1,118 | 1,015 | 0,946 | 0,707 | 0,632 | 0,596 | 0,529 | 4,2096    |
| 0,7000               | 2,321 | 2,605 | 1,683 | 1,329 | 1,163 | 1,072 | 0,971 | 0,905 | 0,683 | 0,611 | 0,577 | 0,512 | 4,9112    |
| 0,8000               | 2,164 | 2,413 | 1,594 | 1,270 | 1,114 | 1,031 | 0,932 | 0,869 | 0,660 | 0,593 | 0,559 | 0,497 | 5,6128    |
| 0,9000               | 2,031 | 2,244 | 1,513 | 1,214 | 1,070 | 0,993 | 0,896 | 0,834 | 0,640 | 0,575 | 0,543 | 0,484 | 6,3144    |
| 1,0000               | 1,911 | 2,092 | 1,440 | 1,165 | 1,028 | 0,955 | 0,863 | 0,802 | 0,619 | 0,557 | 0,527 | 0,471 | 7,0160    |
| 1,2500               | 1,665 | 1,784 | 1,284 | 1,053 | 0,937 | 0,873 | 0,787 | 0,731 | 0,574 | 0,517 | 0,489 | 0,438 | 8,7700    |
| 1,6000               | 1,412 | 1,480 | 1,116 | 0,932 | 0,832 | 0,778 | 0,701 | 0,647 | 0,519 | 0,470 | 0,444 | 0,398 | 11,226    |
| 2,0000               | 1,204 | 1,257 | 0,972 | 0,823 | 0,740 | 0,694 | 0,622 | 0,576 | 0,467 | 0,426 | 0,402 | 0,363 | 14,032    |
| 2,5000               | 1,019 | 1,067 | 0,840 | 0,721 | 0,653 | 0,613 | 0,548 | 0,509 | 0,418 | 0,380 | 0,361 | 0,328 | 17,540    |
| 3,2000               | 0,843 | 0,890 | 0,709 | 0,617 | 0,561 | 0,528 | 0,474 | 0,438 | 0,366 | 0,335 | 0,318 | 0,289 | 22,451    |
| 4,0000               | 0,708 | 0,754 | 0,605 | 0,532 | 0,487 | 0,458 | 0,413 | 0,381 | 0,322 | 0,295 | 0,281 | 0,256 | 28,064    |
| 5,0000               | 0,593 | 0,636 | 0,514 | 0,455 | 0,419 | 0,396 | 0,357 | 0,330 | 0,283 | 0,258 | 0,247 | 0,226 | 35,080    |
| 6,0000               | 0,513 | 0,552 | 0,449 | 0,400 | 0,369 | 0,350 | 0,316 | 0,292 | 0,250 | 0,231 | 0,221 | 0,203 | 42,096    |
| 7,0000               | 0,453 | 0,489 | 0,400 | 0,358 | 0,331 | 0,314 | 0,284 | 0,263 | 0,228 | 0,209 | 0,201 | 0,185 | 49,112    |
| 8,0000               | 0,407 | 0,440 | 0,361 | 0,325 | 0,301 | 0,286 | 0,260 | 0,240 | 0,209 | 0,192 | 0,185 | 0,170 | 56,128    |
| 9,0000               | 0,370 | 0,401 | 0,330 | 0,298 | 0,276 | 0,263 | 0,239 | 0,221 | 0,193 | 0,178 | 0,171 | 0,158 | 63,144    |
| 10,0000              | 0,340 | 0,368 | 0,304 | 0,276 | 0,256 | 0,244 | 0,222 | 0,206 | 0,179 | 0,166 | 0,160 | 0,148 | 70,160    |
| 11,0000              | 0,315 | 0,341 | 0,283 | 0,257 | 0,239 | 0,227 | 0,207 | 0,193 | 0,168 | 0,157 | 0,151 | 0,139 | 77,176    |
| 12,0000              | 0,293 | 0,318 | 0,264 | 0,241 | 0,224 | 0,214 | 0,195 | 0,182 | 0,159 | 0,148 | 0,143 | 0,132 | 84,192    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | H      | He    | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода  | $E$ , МэВ |
|-------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|-------|-----------|
| 0,0125                  | 3,080  | 1,314 | 0,871 | 0,818 | 0,727 | 0,480 | 0,294 | 0,209 | 0,138 | 1,101  | 1,401      | 1,069 | 0,0877    |
| 0,0160                  | 3,420  | 1,442 | 0,969 | 0,912 | 0,810 | 0,547 | 0,339 | 0,242 | 0,160 | 1,239  | 1,576      | 1,190 | 0,1123    |
| 0,0200                  | 3,719  | 1,527 | 1,057 | 0,995 | 0,890 | 0,618 | 0,385 | 0,281 | 0,188 | 1,373  | 1,746      | 1,298 | 0,1403    |
| 0,0250                  | 4,042  | 1,604 | 1,152 | 1,086 | 0,983 | 0,705 | 0,451 | 0,329 | 0,238 | 1,522  | 1,936      | 1,415 | 0,1754    |
| 0,0320                  | 4,483  | 1,701 | 1,261 | 1,200 | 1,097 | 0,822 | 0,534 | 0,402 | 0,280 | 1,709  | 2,180      | 1,565 | 0,2245    |
| 0,0400                  | 4,904  | 1,783 | 1,366 | 1,315 | 1,211 | 0,946 | 0,627 | 0,480 | 0,341 | 1,896  | 2,418      | 1,713 | 0,2806    |
| 0,0500                  | 5,362  | 1,886 | 1,489 | 1,448 | 1,348 | 1,087 | 0,732 | 0,570 | 0,413 | 2,096  | 2,673      | 1,882 | 0,3508    |
| 0,0600                  | 5,842  | 1,999 | 1,621 | 1,567 | 1,481 | 1,219 | 0,829 | 0,652 | 0,479 | 2,275  | 2,905      | 2,043 | 0,4210    |
| 0,0700                  | 6,290  | 2,130 | 1,744 | 1,694 | 1,607 | 1,340 | 0,913 | 0,726 | 0,536 | 2,438  | 3,110      | 2,204 | 0,4911    |
| 0,0800                  | 6,742  | 2,263 | 1,867 | 1,815 | 1,727 | 1,451 | 0,995 | 0,793 | 0,589 | 2,588  | 3,297      | 2,363 | 0,5613    |
| 0,0900                  | 7,148  | 2,398 | 1,983 | 1,933 | 1,840 | 1,552 | 1,067 | 0,854 | 0,632 | 2,722  | 3,461      | 2,513 | 0,6314    |
| 0,1000                  | 7,576  | 2,542 | 2,107 | 2,041 | 1,942 | 1,646 | 1,136 | 0,905 | 0,671 | 2,842  | 3,614      | 2,656 | 0,7016    |
| 0,1250                  | 8,581  | 2,864 | 2,367 | 2,280 | 2,179 | 1,839 | 1,267 | 1,009 | 0,750 | 3,100  | 3,945      | 2,981 | 0,8770    |
| 0,1600                  | 9,788  | 3,263 | 2,678 | 2,581 | 2,448 | 2,039 | 1,399 | 1,114 | 0,826 | 3,374  | 4,286      | 3,381 | 1,1226    |
| 0,2000                  | 10,822 | 3,593 | 2,942 | 2,826 | 2,671 | 2,171 | 1,477 | 1,173 | 0,866 | 3,557  | 4,514      | 3,714 | 1,4032    |
| 0,2500                  | 11,707 | 3,875 | 3,143 | 3,026 | 2,825 | 2,233 | 1,510 | 1,184 | 0,870 | 3,659  | 4,638      | 3,992 | 1,7540    |
| 0,3200                  | 12,353 | 4,032 | 3,280 | 3,130 | 2,864 | 2,194 | 1,464 | 1,142 | 0,834 | 3,664  | 4,654      | 4,155 | 2,2451    |
| 0,4000                  | 12,413 | 4,098 | 3,255 | 3,093 | 2,801 | 2,091 | 1,383 | 1,076 | 0,784 | 3,567  | 4,542      | 4,130 | 2,8064    |
| 0,5000                  | 12,058 | 4,007 | 3,113 | 2,962 | 2,650 | 1,949 | 1,285 | 1,004 | 0,731 | 3,389  | 4,326      | 3,973 | 3,5080    |
| 0,6000                  | 11,310 | 3,794 | 2,871 | 2,729 | 2,438 | 1,783 | 1,183 | 0,923 | 0,675 | 3,138  | 4,027      | 3,681 | 4,2096    |
| 0,7000                  | 10,332 | 3,551 | 2,612 | 2,482 | 2,221 | 1,622 | 1,085 | 0,845 | 0,624 | 2,886  | 3,709      | 3,354 | 4,9112    |
| 0,8000                  | 9,356  | 3,283 | 2,373 | 2,263 | 2,023 | 1,479 | 1,001 | 0,781 | 0,580 | 2,652  | 3,404      | 3,051 | 5,6128    |
| 0,9000                  | 8,474  | 3,020 | 2,164 | 2,063 | 1,834 | 1,353 | 0,923 | 0,729 | 0,542 | 2,444  | 3,134      | 2,775 | 6,3144    |
| 1,0000                  | 7,762  | 2,807 | 2,003 | 1,901 | 1,693 | 1,254 | 0,864 | 0,688 | 0,511 | 2,265  | 2,902      | 2,552 | 7,0160    |
| 1,2500                  | 6,382  | 2,390 | 1,701 | 1,624 | 1,443 | 1,082 | 0,760 | 0,614 | 0,464 | 1,922  | 2,441      | 2,153 | 8,7700    |
| 1,6000                  | 5,043  | 1,975 | 1,426 | 1,363 | 1,221 | 0,932 | 0,668 | 0,543 | 0,421 | 1,590  | 1,989      | 1,772 | 11,2260   |
| 2,0000                  | 4,024  | 1,649 | 1,223 | 1,164 | 1,054 | 0,818 | 0,598 | 0,491 | 0,386 | 1,341  | 1,652      | 1,482 | 14,032    |
| 2,5000                  | 3,175  | 1,365 | 1,042 | 0,992 | 0,915 | 0,724 | 0,537 | 0,448 | 0,356 | 1,130  | 1,368      | 1,235 | 17,54     |
| 3,2000                  | 2,481  | 1,102 | 0,874 | 0,834 | 0,775 | 0,627 | 0,477 | 0,397 | 0,318 | 0,938  | 1,118      | 1,017 | 22,451    |
| 4,0000                  | 1,996  | 0,902 | 0,738 | 0,708 | 0,665 | 0,544 | 0,417 | 0,351 | 0,284 | 0,790  | 0,931      | 0,851 | 28,064    |
| 5,0000                  | 1,634  | 0,743 | 0,621 | 0,508 | 0,564 | 0,467 | 0,363 | 0,307 | 0,252 | 0,665  | 0,779      | 0,713 | 35,080    |
| 6,0000                  | 1,396  | 0,635 | 0,539 | 0,519 | 0,491 | 0,410 | 0,320 | 0,272 | 0,224 | 0,576  | 0,673      | 0,616 | 42,096    |
| 7,0000                  | 1,227  | 0,557 | 0,479 | 0,461 | 0,436 | 0,367 | 0,288 | 0,246 | 0,203 | 0,511  | 0,595      | 0,547 | 49,112    |
| 8,0000                  | 1,097  | 0,496 | 0,491 | 0,416 | 0,393 | 0,332 | 0,261 | 0,224 | 0,186 | 0,460  | 0,534      | 0,492 | 56,128    |
| 9,0000                  | 0,993  | 0,451 | 0,393 | 0,379 | 0,359 | 0,303 | 0,239 | 0,206 | 0,172 | 0,418  | 0,485      | 0,448 | 63,144    |
| 10,0000                 | 0,910  | 0,415 | 0,362 | 0,350 | 0,331 | 0,280 | 0,221 | 0,190 | 0,159 | 0,385  | 0,445      | 0,412 | 70,160    |
| 11,0000                 | 0,839  | 0,385 | 0,337 | 0,325 | 0,307 | 0,260 | 0,206 | 0,177 | 0,148 | 0,356  | 0,412      | 0,382 | 77,176    |
| 12,0000                 | 0,779  | 0,359 | 0,315 | 0,304 | 0,287 | 0,243 | 0,193 | 0,166 | 0,139 | 0,332  | 0,384      | 0,357 | 84,192    |

Таблица 42.6. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов лития  ${}^7\text{Li}^+$  в различных веществах [1] $E_m$  — энергия на единицу массы налетающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                  | 0,091 | 0,105 | 0,149 | 0,228 | 0,276 | 0,320 | 0,353 | 0,390 | 0,614 | 0,724 | 0,790 | 0,937 | 0,0877    |
| 0,0160                  | 0,108 | 0,125 | 0,176 | 0,268 | 0,324 | 0,375 | 0,411 | 0,454 | 0,713 | 0,840 | 0,917 | 1,084 | 0,1123    |
| 0,0200                  | 0,125 | 0,145 | 0,203 | 0,310 | 0,374 | 0,430 | 0,472 | 0,519 | 0,815 | 0,960 | 1,047 | 1,236 | 0,1403    |
| 0,0250                  | 0,144 | 0,168 | 0,234 | 0,356 | 0,431 | 0,493 | 0,540 | 0,593 | 0,930 | 1,094 | 1,193 | 1,407 | 0,1754    |
| 0,0320                  | 0,167 | 0,196 | 0,273 | 0,414 | 0,502 | 0,572 | 0,625 | 0,685 | 1,075 | 1,263 | 1,376 | 1,621 | 0,2245    |
| 0,0400                  | 0,192 | 0,225 | 0,313 | 0,474 | 0,575 | 0,653 | 0,712 | 0,779 | 1,222 | 1,434 | 1,562 | 1,838 | 0,2806    |
| 0,0500                  | 0,219 | 0,258 | 0,358 | 0,541 | 0,657 | 0,743 | 0,809 | 0,884 | 1,388 | 1,626 | 1,770 | 2,080 | 0,3508    |
| 0,0600                  | 0,245 | 0,288 | 0,399 | 0,602 | 0,731 | 0,825 | 0,898 | 0,980 | 1,538 | 1,799 | 1,957 | 2,298 | 0,4210    |
| 0,0700                  | 0,269 | 0,316 | 0,438 | 0,660 | 0,801 | 0,902 | 0,982 | 1,070 | 1,677 | 1,957 | 2,129 | 2,498 | 0,4911    |
| 0,0800                  | 0,292 | 0,343 | 0,475 | 0,714 | 0,866 | 0,974 | 1,060 | 1,154 | 1,807 | 2,107 | 2,290 | 2,685 | 0,5613    |
| 0,0900                  | 0,313 | 0,368 | 0,510 | 0,766 | 0,929 | 1,043 | 1,134 | 1,235 | 1,930 | 2,247 | 2,442 | 2,861 | 0,6314    |
| 0,1000                  | 0,335 | 0,392 | 0,545 | 0,815 | 0,989 | 1,109 | 1,206 | 1,312 | 2,047 | 2,381 | 2,586 | 3,029 | 0,7016    |
| 0,1250                  | 0,387 | 0,449 | 0,627 | 0,934 | 1,131 | 1,266 | 1,377 | 1,494 | 2,322 | 2,694 | 2,923 | 3,418 | 0,8770    |
| 0,1600                  | 0,458 | 0,524 | 0,739 | 1,092 | 1,319 | 1,473 | 1,603 | 1,735 | 2,679 | 3,102 | 3,358 | 3,919 | 1,1226    |
| 0,2000                  | 0,539 | 0,606 | 0,866 | 1,268 | 1,528 | 1,704 | 1,854 | 2,003 | 3,068 | 3,544 | 3,830 | 4,460 | 1,4032    |
| 0,2500                  | 0,644 | 0,708 | 1,027 | 1,487 | 1,786 | 1,989 | 2,165 | 2,334 | 3,543 | 4,082 | 4,402 | 5,116 | 1,7540    |
| 0,3200                  | 0,797 | 0,851 | 1,259 | 1,797 | 2,151 | 2,389 | 2,603 | 2,803 | 4,202 | 4,825 | 5,195 | 6,020 | 2,2451    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е. м | Be      | C       | Al      | Ti      | Ni      | Ge      | Zr      | Ag      | Eu      | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,4000                | 0,984   | 1,021   | 1,535   | 2,162   | 2,576   | 2,854   | 3,113   | 3,349   | 4,958   | 5,676   | 6,101   | 7,050   | 2,8064    |
| 0,5000                | 1,235   | 1,246   | 1,897   | 2,633   | 3,122   | 3,450   | 3,767   | 4,050   | 5,913   | 6,749   | 7,242   | 8,348   | 3,5080    |
| 0,6000                | 1,505   | 1,486   | 2,279   | 3,125   | 3,688   | 4,066   | 4,445   | 4,776   | 6,890   | 7,843   | 8,405   | 9,663   | 4,2096    |
| 0,7000                | 1,796   | 1,745   | 2,685   | 3,641   | 4,278   | 4,707   | 5,151   | 5,535   | 7,900   | 8,972   | 9,601   | 11,012  | 4,9112    |
| 0,8000                | 2,110   | 2,025   | 3,113   | 4,181   | 4,895   | 5,374   | 5,889   | 6,326   | 8,945   | 10,138  | 10,836  | 12,403  | 5,6128    |
| 0,9000                | 2,444   | 2,327   | 3,565   | 4,746   | 5,538   | 6,068   | 6,657   | 7,151   | 10,025  | 11,340  | 12,109  | 13,833  | 6,3144    |
| 1,0000                | 2,801   | 2,651   | 4,041   | 5,336   | 6,207   | 6,789   | 7,455   | 8,009   | 11,140  | 12,580  | 13,421  | 15,302  | 7,0160    |
| 1,2500                | 3,786   | 3,560   | 5,333   | 6,922   | 7,996   | 8,712   | 9,587   | 10,303  | 14,085  | 15,850  | 16,879  | 19,170  | 8,7700    |
| 1,6000                | 5,391   | 5,076   | 7,390   | 9,407   | 10,782  | 11,699  | 12,901  | 13,883  | 18,595  | 20,841  | 22,158  | 25,061  | 11,226    |
| 2,0000                | 7,549   | 7,139   | 10,092  | 12,620  | 14,368  | 15,528  | 17,162  | 18,489  | 24,312  | 27,129  | 28,811  | 32,461  | 14,032    |
| 2,5000                | 10,727  | 10,178  | 13,986  | 17,184  | 19,431  | 20,921  | 23,184  | 24,983  | 32,273  | 35,868  | 38,036  | 42,665  | 17,540    |
| 3,2000                | 16,050  | 15,237  | 20,377  | 24,576  | 27,575  | 29,584  | 32,858  | 35,424  | 44,873  | 49,681  | 52,588  | 58,696  | 22,451    |
| 4,0000                | 23,345  | 22,115  | 28,980  | 34,412  | 38,347  | 41,030  | 45,590  | 49,207  | 61,270  | 67,597  | 71,426  | 79,418  | 28,064    |
| 5,0000                | 34,219  | 32,291  | 41,612  | 48,725  | 53,931  | 57,561  | 63,935  | 69,066  | 84,591  | 93,110  | 98,124  | 108,717 | 35,080    |
| 6,0000                | 46,969  | 44,168  | 56,261  | 65,202  | 71,805  | 76,461  | 84,889  | 91,721  | 111,029 | 121,911 | 128,197 | 141,553 | 42,096    |
| 7,0000                | 61,546  | 57,693  | 72,863  | 83,772  | 91,915  | 97,648  | 108,335 | 117,065 | 140,460 | 153,864 | 161,529 | 177,795 | 49,112    |
| 8,0000                | 77,913  | 72,827  | 91,364  | 104,373 | 114,191 | 121,081 | 134,173 | 145,010 | 172,689 | 188,866 | 197,979 | 217,365 | 56,128    |
| 9,0000                | 96,006  | 89,546  | 111,719 | 126,952 | 138,567 | 146,699 | 162,344 | 175,480 | 207,690 | 226,803 | 237,462 | 260,122 | 63,144    |
| 10,0000               | 115,792 | 107,830 | 133,888 | 151,447 | 165,005 | 174,444 | 192,836 | 208,369 | 245,422 | 267,589 | 279,846 | 305,969 | 70,160    |
| 11,0000               | 137,251 | 127,647 | 157,836 | 177,806 | 193,446 | 204,266 | 225,596 | 243,585 | 285,804 | 311,088 | 324,942 | 354,839 | 77,176    |
| 12,0000               | 160,349 | 148,972 | 183,531 | 206,012 | 223,836 | 236,107 | 260,555 | 281,068 | 328,736 | 357,218 | 372,746 | 406,695 | 84,192    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е. м | H      | He      | N       | O       | Ne      | Ar      | Kr      | Xe      | Rn      | Майлар  | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода    | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------|---------|-----------|
| 0,0125                | 0,034  | 0,087   | 0,130   | 0,138   | 0,156   | 0,245   | 0,421   | 0,618   | 0,961   | 0,103   | 0,080                           | 0,101   | 0,0877    |
| 0,0160                | 0,041  | 0,104   | 0,155   | 0,165   | 0,186   | 0,290   | 0,496   | 0,720   | 1,116   | 0,123   | 0,096                           | 0,121   | 0,1123    |
| 0,0200                | 0,049  | 0,123   | 0,182   | 0,193   | 0,217   | 0,336   | 0,568   | 0,823   | 1,269   | 0,144   | 0,112                           | 0,143   | 0,1403    |
| 0,0250                | 0,057  | 0,145   | 0,213   | 0,226   | 0,253   | 0,387   | 0,649   | 0,934   | 1,429   | 0,167   | 0,130                           | 0,168   | 0,1754    |
| 0,0320                | 0,068  | 0,174   | 0,252   | 0,268   | 0,299   | 0,450   | 0,746   | 1,065   | 1,613   | 0,197   | 0,154                           | 0,200   | 0,2245    |
| 0,0400                | 0,080  | 0,205   | 0,294   | 0,311   | 0,347   | 0,512   | 0,841   | 1,190   | 1,791   | 0,227   | 0,178                           | 0,234   | 0,2806    |
| 0,0500                | 0,094  | 0,243   | 0,343   | 0,361   | 0,401   | 0,580   | 0,943   | 1,322   | 1,975   | 0,262   | 0,205                           | 0,272   | 0,3508    |
| 0,0600                | 0,106  | 0,279   | 0,387   | 0,407   | 0,450   | 0,641   | 1,031   | 1,436   | 2,131   | 0,294   | 0,230                           | 0,307   | 0,4210    |
| 0,0700                | 0,117  | 0,312   | 0,428   | 0,450   | 0,495   | 0,695   | 1,112   | 1,538   | 2,269   | 0,324   | 0,253                           | 0,340   | 0,4911    |
| 0,0800                | 0,128  | 0,344   | 0,467   | 0,490   | 0,537   | 0,746   | 1,186   | 1,630   | 2,394   | 0,352   | 0,275                           | 0,371   | 0,5613    |
| 0,0900                | 0,138  | 0,375   | 0,504   | 0,527   | 0,576   | 0,792   | 1,254   | 1,715   | 2,509   | 0,378   | 0,296                           | 0,400   | 0,6314    |
| 0,1000                | 0,148  | 0,403   | 0,538   | 0,563   | 0,613   | 0,836   | 1,317   | 1,795   | 2,616   | 0,403   | 0,316                           | 0,427   | 0,7016    |
| 0,1250                | 0,170  | 0,468   | 0,616   | 0,644   | 0,698   | 0,937   | 1,463   | 1,978   | 2,863   | 0,462   | 0,362                           | 0,489   | 0,8770    |
| 0,1600                | 0,196  | 0,548   | 0,714   | 0,745   | 0,804   | 1,063   | 1,647   | 2,209   | 3,174   | 0,538   | 0,422                           | 0,566   | 1,1226    |
| 0,2000                | 0,223  | 0,630   | 0,813   | 0,849   | 0,914   | 1,196   | 1,842   | 2,454   | 3,505   | 0,619   | 0,485                           | 0,645   | 1,4032    |
| 0,2500                | 0,255  | 0,724   | 0,929   | 0,968   | 1,041   | 1,356   | 2,077   | 2,752   | 3,909   | 0,716   | 0,562                           | 0,736   | 1,7540    |
| 0,3200                | 0,295  | 0,848   | 1,081   | 1,128   | 1,214   | 1,577   | 2,407   | 3,174   | 4,485   | 0,850   | 0,668                           | 0,857   | 2,2451    |
| 0,4000                | 0,341  | 0,986   | 1,253   | 1,308   | 1,412   | 1,839   | 2,802   | 3,681   | 5,179   | 1,005   | 0,790                           | 0,992   | 2,8064    |
| 0,5000                | 0,398  | 1,159   | 1,474   | 1,540   | 1,670   | 2,187   | 3,328   | 4,356   | 6,107   | 1,207   | 0,948                           | 1,165   | 3,5080    |
| 0,6000                | 0,458  | 1,339   | 1,709   | 1,787   | 1,946   | 2,564   | 3,898   | 5,086   | 7,106   | 1,422   | 1,116                           | 1,349   | 4,2096    |
| 0,7000                | 0,523  | 1,530   | 1,965   | 2,057   | 2,248   | 2,977   | 4,517   | 5,881   | 8,187   | 1,656   | 1,298                           | 1,549   | 4,9112    |
| 0,8000                | 0,595  | 1,736   | 2,247   | 2,353   | 2,579   | 3,430   | 5,191   | 6,745   | 9,353   | 1,909   | 1,495                           | 1,768   | 5,6128    |
| 0,9000                | 0,673  | 1,959   | 2,557   | 2,678   | 2,943   | 3,926   | 5,921   | 7,675   | 10,605  | 2,185   | 1,710                           | 2,009   | 6,3144    |
| 1,0000                | 0,760  | 2,200   | 2,894   | 3,032   | 3,341   | 4,465   | 6,707   | 8,665   | 11,939  | 2,483   | 1,943                           | 2,273   | 7,0160    |
| 1,2500                | 1,010  | 2,878   | 3,846   | 4,032   | 4,466   | 5,973   | 8,875   | 11,368  | 15,547  | 3,326   | 2,603                           | 3,023   | 8,7700    |
| 1,6000                | 1,444  | 4,012   | 5,427   | 5,687   | 6,321   | 8,425   | 12,328  | 15,631  | 21,120  | 4,735   | 3,721                           | 4,284   | 11,226    |
| 2,0000                | 2,069  | 5,572   | 7,558   | 7,921   | 8,802   | 11,647  | 16,779  | 21,076  | 28,099  | 6,662   | 5,274                           | 6,021   | 14,032    |
| 2,5000                | 3,054  | 7,918   | 10,676  | 11,195  | 12,385  | 16,217  | 22,983  | 28,577  | 37,581  | 9,520   | 7,615                           | 8,623   | 17,540    |
| 3,2000                | 4,813  | 11,941  | 15,843  | 16,617  | 18,240  | 23,531  | 32,713  | 40,266  | 52,215  | 14,311  | 11,604                          | 13,025  | 22,451    |
| 4,0000                | 7,346  | 17,591  | 22,858  | 23,948  | 26,085  | 33,168  | 45,333  | 55,339  | 70,929  | 20,856  | 17,128                          | 19,081  | 28,064    |
| 5,0000                | 11,247 | 26,198  | 33,261  | 34,774  | 37,585  | 47,133  | 63,413  | 76,781  | 97,236  | 30,575  | 25,403                          | 28,122  | 35,080    |
| 6,0000                | 15,906 | 36,449  | 45,413  | 47,403  | 50,952  | 63,203  | 84,029  | 101,111 | 126,825 | 41,941  | 35,125                          | 38,735  | 42,096    |
| 7,0000                | 21,280 | 48,275  | 59,249  | 61,771  | 66,134  | 81,327  | 107,149 | 128,256 | 159,727 | 54,896  | 46,238                          | 50,849  | 49,112    |
| 8,0000                | 27,336 | 61,640  | 74,712  | 77,803  | 83,100  | 101,469 | 132,756 | 158,192 | 195,859 | 69,390  | 58,701                          | 64,398  | 56,128    |
| 9,0000                | 34,066 | 76,482  | 91,774  | 95,480  | 101,800 | 123,606 | 160,869 | 190,942 | 235,189 | 85,406  | 72,497                          | 79,365  | 63,144    |
| 10,0000               | 41,456 | 92,705  | 110,387 | 114,758 | 122,176 | 147,702 | 191,404 | 226,468 | 277,697 | 102,917 | 87,604                          | 95,720  | 70,160    |
| 11,0000               | 49,492 | 110,269 | 130,495 | 135,582 | 144,187 | 173,733 | 224,299 | 264,722 | 323,398 | 121,886 | 103,990                         | 113,420 | 77,176    |
| 12,0000               | 58,174 | 129,156 | 152,070 | 157,926 | 167,804 | 201,663 | 259,498 | 305,639 | 372,249 | 142,288 | 121,639                         | 132,440 | 84,192    |

Т а б л и ц а 42.7. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов <sup>9</sup>Be<sup>+</sup> [1]

$E_m$  — энергия на единицу массы налетающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е. м. | Be     | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zc    | Ag    | Eu    | Ta     | Au                              | U     | $E$ , МэВ |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|-------|-----------|
| 0,0125                 | 1,800  | 1,489 | 1,091 | 0,725 | 0,589 | 0,534 | 0,495 | 0,458 | 0,291 | 0,249  | 0,229                           | 0,196 | 0,1127    |
| 0,0160                 | 2,036  | 1,684 | 1,234 | 0,821 | 0,666 | 0,605 | 0,560 | 0,518 | 0,329 | 0,282  | 0,259                           | 0,222 | 0,1442    |
| 0,0200                 | 2,276  | 1,883 | 1,380 | 0,917 | 0,745 | 0,676 | 0,626 | 0,579 | 0,368 | 0,315  | 0,290                           | 0,248 | 0,1602    |
| 0,0250                 | 2,545  | 2,105 | 1,542 | 1,026 | 0,833 | 0,756 | 0,700 | 0,648 | 0,412 | 0,352  | 0,325                           | 0,278 | 0,2253    |
| 0,0320                 | 2,876  | 2,384 | 1,745 | 1,160 | 0,944 | 0,859 | 0,792 | 0,733 | 0,466 | 0,400  | 0,368                           | 0,316 | 0,2884    |
| 0,0400                 | 3,199  | 2,664 | 1,946 | 1,298 | 1,058 | 0,965 | 0,889 | 0,823 | 0,523 | 0,450  | 0,414                           | 0,356 | 0,3605    |
| 0,0500                 | 3,538  | 2,966 | 2,160 | 1,447 | 1,186 | 1,080 | 0,996 | 0,922 | 0,585 | 0,509  | 0,469                           | 0,403 | 0,4506    |
| 0,0600                 | 3,820  | 3,233 | 2,341 | 1,578 | 1,297 | 1,177 | 1,088 | 1,009 | 0,646 | 0,562  | 0,518                           | 0,446 | 0,5407    |
| 0,0700                 | 4,050  | 3,465 | 2,493 | 1,690 | 1,396 | 1,266 | 1,171 | 1,087 | 0,698 | 0,611  | 0,566                           | 0,486 | 0,6309    |
| 0,0800                 | 4,236  | 3,670 | 2,618 | 1,788 | 1,479 | 1,340 | 1,238 | 1,152 | 0,746 | 0,654  | 0,605                           | 0,521 | 0,7210    |
| 0,0900                 | 4,381  | 3,846 | 2,720 | 1,871 | 1,550 | 1,409 | 1,297 | 1,208 | 0,791 | 0,692  | 0,642                           | 0,553 | 0,8111    |
| 0,1000                 | 4,494  | 3,996 | 2,800 | 1,940 | 1,613 | 1,462 | 1,344 | 1,257 | 0,829 | 0,725  | 0,672                           | 0,580 | 0,9012    |
| 0,1250                 | 4,653  | 4,293 | 2,926 | 2,060 | 1,721 | 1,560 | 1,434 | 1,343 | 0,900 | 0,787  | 0,736                           | 0,636 | 1,1265    |
| 0,1600                 | 4,692  | 4,561 | 2,991 | 2,141 | 1,800 | 1,633 | 1,498 | 1,406 | 0,957 | 0,840  | 0,788                           | 0,688 | 1,4420    |
| 0,2000                 | 4,633  | 4,702 | 2,993 | 2,176 | 1,841 | 1,667 | 1,529 | 1,434 | 0,994 | 0,877  | 0,823                           | 0,718 | 1,8024    |
| 0,2500                 | 4,508  | 4,742 | 2,960 | 2,187 | 1,859 | 1,687 | 1,545 | 1,447 | 1,021 | 0,903  | 0,847                           | 0,740 | 2,2530    |
| 0,3200                 | 4,327  | 4,701 | 2,900 | 2,184 | 1,865 | 1,702 | 1,551 | 1,450 | 1,038 | 0,922  | 0,866                           | 0,761 | 2,8839    |
| 0,4000                 | 4,142  | 4,598 | 2,833 | 2,159 | 1,859 | 1,700 | 1,550 | 1,448 | 1,054 | 0,938  | 0,881                           | 0,773 | 3,6049    |
| 0,5000                 | 3,947  | 4,435 | 2,760 | 2,133 | 1,849 | 1,697 | 1,546 | 1,441 | 1,065 | 0,949  | 0,893                           | 0,787 | 4,5061    |
| 0,6000                 | 3,734  | 4,205 | 2,663 | 2,085 | 1,816 | 1,673 | 1,518 | 1,414 | 1,057 | 0,945  | 0,891                           | 0,791 | 5,4073    |
| 0,7000                 | 3,547  | 3,981 | 2,572 | 2,032 | 1,777 | 1,638 | 1,484 | 1,384 | 1,044 | 0,934  | 0,882                           | 0,782 | 6,3085    |
| 0,8000                 | 3,374  | 3,762 | 2,485 | 1,980 | 1,737 | 1,608 | 1,453 | 1,354 | 1,029 | 0,924  | 0,872                           | 0,775 | 7,2098    |
| 0,9000                 | 3,222  | 3,560 | 2,401 | 1,925 | 1,697 | 1,575 | 1,421 | 1,323 | 1,015 | 0,912  | 0,862                           | 0,768 | 8,1110    |
| 1,0000                 | 3,079  | 3,371 | 2,320 | 1,877 | 1,656 | 1,538 | 1,390 | 1,292 | 0,998 | 0,898  | 0,849                           | 0,759 | 9,0122    |
| 1,2500                 | 2,766  | 2,962 | 2,132 | 1,749 | 1,557 | 1,450 | 1,307 | 1,213 | 0,953 | 0,859  | 0,812                           | 0,727 | 11,265    |
| 1,6000                 | 2,410  | 2,526 | 1,904 | 1,590 | 1,420 | 1,327 | 1,195 | 1,104 | 0,885 | 0,801  | 0,758                           | 0,680 | 14,420    |
| 2,0000                 | 2,091  | 2,183 | 1,688 | 1,430 | 1,285 | 1,205 | 1,080 | 1,001 | 0,810 | 0,739  | 0,699                           | 0,630 | 18,024    |
| 2,5000                 | 1,789  | 1,875 | 1,475 | 1,267 | 1,146 | 1,077 | 0,963 | 0,894 | 0,735 | 0,668  | 0,634                           | 0,575 | 22,530    |
| 3,2000                 | 1,491  | 1,575 | 1,254 | 1,091 | 0,993 | 0,934 | 0,838 | 0,775 | 0,647 | 0,592  | 0,562                           | 0,510 | 28,839    |
| 4,0000                 | 1,256  | 1,337 | 1,073 | 0,943 | 0,864 | 0,814 | 0,733 | 0,676 | 0,572 | 0,524  | 0,499                           | 0,454 | 36,049    |
| 5,0000                 | 1,053  | 1,129 | 0,913 | 0,809 | 0,745 | 0,703 | 0,633 | 0,586 | 0,502 | 0,458  | 0,439                           | 0,401 | 45,061    |
| 6,0000                 | 0,912  | 0,980 | 0,797 | 0,711 | 0,656 | 0,622 | 0,561 | 0,519 | 0,445 | 0,410  | 0,393                           | 0,361 | 54,073    |
| 7,0000                 | 0,804  | 0,869 | 0,709 | 0,635 | 0,587 | 0,558 | 0,505 | 0,467 | 0,404 | 0,372  | 0,357                           | 0,328 | 63,085    |
| 8,0000                 | 0,721  | 0,781 | 0,640 | 0,576 | 0,533 | 0,507 | 0,461 | 0,426 | 0,370 | 0,341  | 0,328                           | 0,302 | 72,098    |
| 9,0000                 | 0,656  | 0,710 | 0,584 | 0,528 | 0,489 | 0,466 | 0,424 | 0,392 | 0,342 | 0,316  | 0,303                           | 0,280 | 81,110    |
| 10,0000                | 0,602  | 0,651 | 0,538 | 0,488 | 0,452 | 0,431 | 0,392 | 0,364 | 0,318 | 0,295  | 0,284                           | 0,262 | 90,122    |
| 11,0000                | 0,557  | 0,603 | 0,500 | 0,455 | 0,422 | 0,402 | 0,366 | 0,341 | 0,298 | 0,277  | 0,267                           | 0,246 | 99,134    |
| 12,0000                | 0,519  | 0,562 | 0,467 | 0,426 | 0,395 | 0,378 | 0,344 | 0,321 | 0,281 | 0,261  | 0,252                           | 0,232 | 108,15    |
| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е. м. | H      | He    | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода  | $E$ , МэВ |
| 0,0125                 | 4,090  | 1,745 | 1,156 | 1,086 | 0,965 | 0,637 | 0,390 | 0,277 | 0,183 | 1,463  | 1,861                           | 1,420 | 0,1127    |
| 0,0160                 | 4,541  | 1,915 | 1,287 | 1,210 | 1,076 | 0,727 | 0,450 | 0,321 | 0,213 | 1,645  | 2,093                           | 1,581 | 0,1442    |
| 0,0200                 | 4,939  | 2,028 | 1,403 | 1,322 | 1,182 | 0,821 | 0,512 | 0,372 | 0,249 | 1,824  | 2,319                           | 1,723 | 0,1802    |
| 0,0250                 | 5,367  | 2,130 | 1,530 | 1,442 | 1,305 | 0,936 | 0,598 | 0,436 | 0,316 | 2,020  | 2,571                           | 1,879 | 0,2253    |
| 0,0320                 | 5,950  | 2,258 | 1,673 | 1,593 | 1,455 | 1,091 | 0,708 | 0,534 | 0,372 | 2,268  | 2,893                           | 2,077 | 0,2884    |
| 0,0400                 | 6,518  | 2,370 | 1,815 | 1,747 | 1,609 | 1,257 | 0,833 | 0,638 | 0,453 | 2,520  | 3,214                           | 2,276 | 0,3605    |
| 0,0500                 | 7,150  | 2,514 | 1,985 | 1,931 | 1,797 | 1,449 | 0,976 | 0,760 | 0,551 | 2,795  | 3,564                           | 2,510 | 0,4506    |
| 0,0600                 | 7,818  | 2,676 | 2,170 | 2,097 | 1,983 | 1,632 | 1,110 | 0,873 | 0,641 | 3,045  | 3,888                           | 2,734 | 0,5407    |
| 0,0700                 | 8,450  | 2,861 | 2,343 | 2,276 | 2,159 | 1,800 | 1,226 | 0,975 | 0,720 | 3,275  | 4,177                           | 2,961 | 0,6309    |
| 0,0800                 | 9,084  | 3,050 | 2,516 | 2,445 | 2,327 | 1,956 | 1,340 | 1,068 | 0,793 | 3,487  | 4,443                           | 3,183 | 0,7210    |
| 0,0900                 | 9,655  | 3,239 | 2,679 | 2,611 | 2,486 | 2,097 | 1,441 | 1,153 | 0,854 | 3,677  | 4,675                           | 3,394 | 0,8111    |
| 0,1000                 | 10,248 | 3,438 | 2,850 | 2,761 | 2,626 | 2,226 | 1,537 | 1,224 | 0,907 | 3,844  | 4,889                           | 3,592 | 0,9012    |
| 0,1250                 | 11,618 | 3,877 | 3,204 | 3,087 | 2,950 | 2,490 | 1,715 | 1,367 | 1,015 | 4,196  | 5,341                           | 4,035 | 1,1265    |
| 0,1600                 | 13,248 | 4,417 | 3,625 | 3,493 | 3,314 | 2,760 | 1,893 | 1,507 | 1,118 | 4,567  | 5,802                           | 4,576 | 1,4420    |
| 0,2000                 | 14,694 | 4,878 | 3,995 | 3,837 | 3,627 | 2,948 | 2,005 | 1,592 | 1,176 | 4,830  | 6,129                           | 5,043 | 1,8024    |
| 0,2500                 | 16,043 | 5,310 | 4,307 | 4,147 | 3,872 | 3,061 | 2,069 | 1,622 | 1,193 | 5,014  | 6,355                           | 5,470 | 2,2530    |
| 0,3200                 | 17,225 | 5,623 | 4,573 | 4,364 | 3,993 | 3,059 | 2,041 | 1,592 | 1,163 | 5,109  | 6,490                           | 5,794 | 2,8839    |
| 0,4000                 | 17,679 | 5,836 | 4,635 | 4,405 | 3,989 | 2,978 | 1,969 | 1,533 | 1,116 | 5,080  | 6,468                           | 5,882 | 3,6049    |
| 0,5000                 | 17,609 | 5,851 | 4,546 | 4,325 | 3,870 | 2,846 | 1,877 | 1,466 | 1,068 | 4,949  | 6,318                           | 5,802 | 4,5061    |
| 0,6000                 | 16,912 | 5,673 | 4,293 | 4,080 | 3,646 | 2,666 | 1,768 | 1,380 | 1,009 | 4,693  | 6,022                           | 5,505 | 5,4073    |
| 0,7000                 | 15,792 | 5,427 | 3,992 | 3,794 | 3,395 | 2,479 | 1,659 | 1,291 | 0,954 | 4,411  | 5,669                           | 5,126 | 6,3085    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м | H      | He    | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода  | $E$ , МэВ |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|-------|-----------|
| 0,8000                 | 14,584 | 5,118 | 3,700 | 3,528 | 3,153 | 2,306 | 1,560 | 1,217 | 0,904 | 4,134  | 5,307                           | 4,755 | 7,2098    |
| 0,9000                 | 13,444 | 4,792 | 3,433 | 3,272 | 2,910 | 2,146 | 1,464 | 1,157 | 0,859 | 3,877  | 4,972                           | 4,403 | 8,1110    |
| 1,0000                 | 12,505 | 4,522 | 3,227 | 3,062 | 2,728 | 2,021 | 1,392 | 1,109 | 0,824 | 3,649  | 4,675                           | 4,111 | 9,0122    |
| 1,2500                 | 10,598 | 3,968 | 2,825 | 2,697 | 2,397 | 1,798 | 1,262 | 1,019 | 0,770 | 3,192  | 4,054                           | 3,576 | 11,265    |
| 1,6000                 | 8,604  | 3,369 | 2,433 | 2,326 | 2,083 | 1,590 | 1,140 | 0,927 | 0,718 | 2,713  | 3,394                           | 3,023 | 14,420    |
| 2,0000                 | 6,988  | 2,865 | 2,123 | 2,022 | 1,830 | 1,421 | 1,038 | 0,852 | 0,670 | 2,329  | 2,870                           | 2,574 | 18,024    |
| 2,5000                 | 5,577  | 2,397 | 1,831 | 1,742 | 1,608 | 1,272 | 0,944 | 0,786 | 0,626 | 1,986  | 2,403                           | 2,169 | 22,530    |
| 3,2000                 | 4,390  | 1,950 | 1,546 | 1,476 | 1,371 | 1,110 | 0,844 | 0,702 | 0,563 | 1,659  | 1,978                           | 1,800 | 28,839    |
| 4,0000                 | 3,542  | 1,601 | 1,309 | 1,256 | 1,181 | 0,966 | 0,741 | 0,624 | 0,504 | 1,402  | 1,652                           | 1,510 | 36,049    |
| 5,0000                 | 2,903  | 1,319 | 1,104 | 1,062 | 1,001 | 0,830 | 0,645 | 0,545 | 0,447 | 1,181  | 1,383                           | 1,267 | 45,061    |
| 6,0000                 | 2,478  | 1,127 | 0,958 | 0,921 | 0,873 | 0,728 | 0,569 | 0,484 | 0,398 | 1,023  | 1,194                           | 1,094 | 54,073    |
| 7,0000                 | 2,177  | 0,988 | 0,849 | 0,819 | 0,774 | 0,651 | 0,512 | 0,437 | 0,361 | 0,907  | 1,056                           | 0,970 | 63,085    |
| 8,0000                 | 1,946  | 0,880 | 0,765 | 0,738 | 0,697 | 0,588 | 0,463 | 0,397 | 0,330 | 0,815  | 0,947                           | 0,872 | 72,098    |
| 9,0000                 | 1,759  | 0,799 | 0,696 | 0,672 | 0,636 | 0,538 | 0,424 | 0,364 | 0,304 | 0,741  | 0,860                           | 0,793 | 81,110    |
| 10,0000                | 1,610  | 0,735 | 0,641 | 0,619 | 0,586 | 0,495 | 0,391 | 0,336 | 0,282 | 0,681  | 0,788                           | 0,729 | 90,122    |
| 11,0000                | 1,484  | 0,681 | 0,595 | 0,575 | 0,544 | 0,460 | 0,364 | 0,313 | 0,262 | 0,630  | 0,729                           | 0,676 | 99,134    |
| 12,0000                | 1,377  | 0,634 | 0,556 | 0,537 | 0,508 | 0,429 | 0,341 | 0,294 | 0,246 | 0,587  | 0,678                           | 0,630 | 108,15    |

Т а б л и ц а 42.8. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов бериллия  $^9\text{Be}^+$  в различных веществах [1] $E_m$  — энергия на единицу массы налетающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м | Be      | C       | Al      | Ti      | Ni      | Ge      | Zr      | Ag      | Eu      | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,0125                 | 0,085   | 0,097   | 0,137   | 0,210   | 0,252   | 0,295   | 0,325   | 0,360   | 0,566   | 0,669   | 0,730   | 0,868   | 0,1127    |
| 0,0160                 | 0,101   | 0,116   | 0,163   | 0,248   | 0,298   | 0,346   | 0,381   | 0,421   | 0,660   | 0,779   | 0,850   | 1,009   | 0,1448    |
| 0,0200                 | 0,117   | 0,136   | 0,189   | 0,287   | 0,346   | 0,400   | 0,438   | 0,483   | 0,758   | 0,893   | 0,974   | 1,154   | 0,1802    |
| 0,0250                 | 0,135   | 0,157   | 0,219   | 0,332   | 0,400   | 0,460   | 0,503   | 0,554   | 0,868   | 1,022   | 1,114   | 1,318   | 0,2253    |
| 0,0320                 | 0,158   | 0,185   | 0,256   | 0,388   | 0,469   | 0,536   | 0,585   | 0,642   | 1,006   | 1,183   | 1,289   | 1,522   | 0,2884    |
| 0,0400                 | 0,182   | 0,213   | 0,295   | 0,445   | 0,539   | 0,613   | 0,669   | 0,733   | 1,148   | 1,348   | 1,468   | 1,731   | 0,3605    |
| 0,0500                 | 0,208   | 0,245   | 0,338   | 0,510   | 0,617   | 0,699   | 0,762   | 0,834   | 1,307   | 1,532   | 1,667   | 1,963   | 0,4506    |
| 0,0600                 | 0,233   | 0,273   | 0,378   | 0,568   | 0,689   | 0,778   | 0,848   | 0,926   | 1,451   | 1,697   | 1,847   | 2,172   | 0,5407    |
| 0,0700                 | 0,256   | 0,300   | 0,414   | 0,623   | 0,754   | 0,851   | 0,926   | 1,011   | 1,583   | 1,849   | 2,011   | 2,362   | 0,6309    |
| 0,0800                 | 0,277   | 0,325   | 0,450   | 0,675   | 0,816   | 0,920   | 1,001   | 1,091   | 1,706   | 1,989   | 2,163   | 2,539   | 0,7210    |
| 0,0900                 | 0,298   | 0,349   | 0,483   | 0,724   | 0,876   | 0,986   | 1,072   | 1,168   | 1,823   | 2,123   | 2,307   | 2,707   | 0,8111    |
| 0,1000                 | 0,319   | 0,372   | 0,516   | 0,771   | 0,933   | 1,048   | 1,140   | 1,241   | 1,935   | 2,250   | 2,444   | 2,866   | 0,9012    |
| 0,1250                 | 0,368   | 0,427   | 0,595   | 0,884   | 1,068   | 1,197   | 1,302   | 1,414   | 2,195   | 2,548   | 2,764   | 3,236   | 1,1265    |
| 0,1600                 | 0,435   | 0,498   | 0,701   | 1,033   | 1,246   | 1,394   | 1,517   | 1,643   | 2,534   | 2,934   | 3,177   | 3,711   | 1,4420    |
| 0,2000                 | 0,512   | 0,575   | 0,821   | 1,200   | 1,444   | 1,612   | 1,755   | 1,896   | 2,903   | 3,354   | 3,624   | 4,224   | 1,8024    |
| 0,2500                 | 0,611   | 0,671   | 0,973   | 1,407   | 1,688   | 1,881   | 2,048   | 2,209   | 3,350   | 3,860   | 4,163   | 4,841   | 2,2530    |
| 0,3200                 | 0,754   | 0,804   | 1,188   | 1,695   | 2,027   | 2,253   | 2,455   | 2,644   | 3,963   | 4,551   | 4,900   | 5,682   | 2,8839    |
| 0,4000                 | 0,924   | 0,960   | 1,440   | 2,027   | 2,414   | 2,677   | 2,920   | 3,142   | 4,652   | 5,326   | 5,726   | 6,621   | 3,6049    |
| 0,5000                 | 1,147   | 1,159   | 1,762   | 2,447   | 2,900   | 3,208   | 3,503   | 3,766   | 5,503   | 6,282   | 6,742   | 7,777   | 4,5061    |
| 0,6000                 | 1,382   | 1,368   | 2,094   | 2,875   | 3,392   | 3,743   | 4,091   | 4,398   | 6,352   | 7,233   | 7,753   | 8,919   | 5,4073    |
| 0,7000                 | 1,629   | 1,588   | 2,439   | 3,313   | 3,894   | 4,287   | 4,691   | 5,042   | 7,209   | 8,192   | 8,769   | 10,065  | 6,3085    |
| 0,8000                 | 1,890   | 1,821   | 2,795   | 3,762   | 4,407   | 4,842   | 5,305   | 5,700   | 8,079   | 9,162   | 9,797   | 11,223  | 7,2098    |
| 0,9000                 | 2,163   | 2,067   | 3,164   | 4,223   | 4,931   | 5,409   | 5,932   | 6,374   | 8,961   | 10,144  | 10,836  | 12,391  | 8,1110    |
| 1,0000                 | 2,450   | 2,328   | 3,546   | 4,698   | 5,469   | 5,988   | 6,573   | 7,063   | 9,856   | 11,140  | 11,890  | 13,571  | 9,0122    |
| 1,2500                 | 3,222   | 3,041   | 4,560   | 5,942   | 6,872   | 7,497   | 8,246   | 8,863   | 12,167  | 13,705  | 14,603  | 16,605  | 11,265    |
| 1,6000                 | 4,445   | 4,196   | 6,127   | 7,835   | 8,996   | 9,773   | 10,771  | 11,590  | 15,603  | 17,508  | 18,625  | 21,095  | 14,420    |
| 2,0000                 | 6,054   | 5,734   | 8,141   | 10,230  | 11,668  | 12,627  | 13,947  | 15,024  | 19,865  | 22,196  | 23,585  | 26,611  | 18,024    |
| 2,5000                 | 8,389   | 7,967   | 11,003  | 13,584  | 15,339  | 16,590  | 18,373  | 19,796  | 25,715  | 28,618  | 30,364  | 34,110  | 22,530    |
| 3,2000                 | 12,265  | 11,650  | 15,656  | 19,967  | 21,320  | 22,898  | 25,417  | 27,399  | 34,890  | 38,676  | 40,960  | 45,783  | 28,839    |
| 4,0000                 | 17,552  | 16,634  | 21,891  | 26,095  | 29,126  | 31,193  | 34,644  | 37,388  | 46,773  | 51,660  | 54,612  | 60,800  | 36,049    |
| 5,0000                 | 25,417  | 23,996  | 31,029  | 36,449  | 40,399  | 43,152  | 47,914  | 51,753  | 63,643  | 70,115  | 73,925  | 81,994  | 45,061    |
| 6,0000                 | 34,639  | 32,586  | 41,624  | 48,366  | 53,326  | 56,820  | 63,069  | 68,138  | 82,764  | 90,945  | 95,675  | 105,743 | 54,073    |
| 7,0000                 | 45,188  | 42,373  | 53,637  | 61,803  | 67,878  | 72,152  | 80,035  | 86,477  | 104,061 | 114,067 | 119,795 | 131,968 | 63,085    |
| 8,0000                 | 57,040  | 53,333  | 67,036  | 76,722  | 84,010  | 89,122  | 98,746  | 106,715 | 127,401 | 139,416 | 146,192 | 160,624 | 72,098    |
| 9,0000                 | 70,155  | 65,451  | 81,789  | 93,088  | 101,678 | 107,691 | 119,165 | 128,800 | 152,770 | 166,913 | 174,809 | 191,616 | 81,110    |
| 10,0000                | 84,508  | 78,716  | 97,872  | 110,858 | 120,858 | 127,818 | 141,286 | 152,660 | 180,143 | 196,501 | 205,557 | 224,876 | 90,122    |
| 11,0000                | 100,089 | 93,104  | 115,259 | 129,997 | 141,508 | 149,471 | 165,072 | 178,229 | 209,464 | 228,085 | 238,300 | 260,359 | 99,134    |
| 12,0000                | 116,873 | 108,600 | 133,931 | 150,492 | 163,592 | 172,608 | 190,475 | 205,467 | 240,660 | 261,605 | 273,037 | 298,040 | 108,15    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | H      | He     | N       | O       | Ne      | Ar      | Kr      | Xe      | Rn      | Майлар  | $(CH_2)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|-------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|--------|-----------|
| 0,0125                  | 0,031  | 0,081  | 0,120   | 0,127   | 0,143   | 0,224   | 0,385   | 0,566   | 0,883   | 0,095   | 0,074      | 0,093  | 0,1127    |
| 0,0160                  | 0,038  | 0,097  | 0,144   | 0,153   | 0,171   | 0,267   | 0,454   | 0,663   | 1,030   | 0,114   | 0,089      | 0,112  | 0,1442    |
| 0,0200                  | 0,045  | 0,115  | 0,169   | 0,180   | 0,201   | 0,311   | 0,524   | 0,761   | 1,176   | 0,134   | 0,105      | 0,133  | 0,1802    |
| 0,0250                  | 0,054  | 0,136  | 0,199   | 0,211   | 0,236   | 0,360   | 0,601   | 0,867   | 1,328   | 0,156   | 0,122      | 0,157  | 0,2253    |
| 0,0320                  | 0,064  | 0,164  | 0,237   | 0,251   | 0,280   | 0,420   | 0,695   | 0,993   | 1,505   | 0,185   | 0,145      | 0,188  | 0,2884    |
| 0,0400                  | 0,076  | 0,194  | 0,277   | 0,293   | 0,326   | 0,480   | 0,786   | 1,113   | 1,676   | 0,215   | 0,168      | 0,220  | 0,3605    |
| 0,0500                  | 0,089  | 0,231  | 0,324   | 0,341   | 0,378   | 0,545   | 0,884   | 1,240   | 1,852   | 0,248   | 0,194      | 0,257  | 0,4506    |
| 0,0600                  | 0,100  | 0,265  | 0,366   | 0,385   | 0,425   | 0,603   | 0,969   | 1,349   | 2,002   | 0,278   | 0,218      | 0,291  | 0,5407    |
| 0,0700                  | 0,111  | 0,297  | 0,406   | 0,426   | 0,468   | 0,655   | 1,045   | 1,446   | 2,134   | 0,307   | 0,240      | 0,322  | 0,6309    |
| 0,0800                  | 0,122  | 0,328  | 0,443   | 0,464   | 0,508   | 0,703   | 1,115   | 1,535   | 2,253   | 0,333   | 0,261      | 0,351  | 0,7210    |
| 0,0900                  | 0,131  | 0,356  | 0,478   | 0,500   | 0,545   | 0,748   | 1,180   | 1,616   | 2,363   | 0,359   | 0,281      | 0,379  | 0,8111    |
| 0,1000                  | 0,140  | 0,383  | 0,510   | 0,533   | 0,580   | 0,789   | 1,241   | 1,691   | 2,465   | 0,382   | 0,300      | 0,405  | 0,9012    |
| 0,1250                  | 0,161  | 0,445  | 0,584   | 0,610   | 0,661   | 0,885   | 1,379   | 1,865   | 2,699   | 0,438   | 0,344      | 0,464  | 1,1265    |
| 0,1600                  | 0,186  | 0,521  | 0,677   | 0,706   | 0,762   | 1,005   | 1,554   | 2,084   | 2,994   | 0,510   | 0,400      | 0,537  | 1,4420    |
| 0,2000                  | 0,212  | 0,598  | 0,771   | 0,804   | 0,866   | 1,131   | 1,739   | 2,317   | 3,308   | 0,587   | 0,461      | 0,612  | 1,8024    |
| 0,2500                  | 0,241  | 0,687  | 0,880   | 0,917   | 0,986   | 1,281   | 1,960   | 2,597   | 3,688   | 0,678   | 0,533      | 0,697  | 2,2530    |
| 0,3200                  | 0,279  | 0,802  | 1,022   | 1,065   | 1,146   | 1,487   | 2,267   | 2,990   | 4,224   | 0,803   | 0,631      | 0,809  | 2,8839    |
| 0,4000                  | 0,320  | 0,928  | 1,179   | 1,230   | 1,327   | 1,726   | 2,626   | 3,451   | 4,857   | 0,945   | 0,742      | 0,933  | 3,6049    |
| 0,5000                  | 0,372  | 1,082  | 1,375   | 1,436   | 1,556   | 2,036   | 3,095   | 4,053   | 5,683   | 1,124   | 0,883      | 1,087  | 4,5061    |
| 0,6000                  | 0,424  | 1,239  | 1,579   | 1,651   | 1,796   | 2,363   | 3,590   | 4,687   | 6,551   | 1,311   | 1,030      | 1,247  | 5,4073    |
| 0,7000                  | 0,479  | 1,401  | 1,797   | 1,880   | 2,052   | 2,713   | 4,116   | 5,362   | 7,469   | 1,510   | 1,184      | 1,416  | 6,3085    |
| 0,8000                  | 0,538  | 1,572  | 2,031   | 2,126   | 2,328   | 3,090   | 4,676   | 6,081   | 8,439   | 1,721   | 1,348      | 1,599  | 7,2098    |
| 0,9000                  | 0,603  | 1,754  | 2,284   | 2,392   | 2,625   | 3,496   | 5,273   | 6,840   | 9,462   | 1,946   | 1,524      | 1,796  | 8,1110    |
| 1,0000                  | 0,672  | 1,948  | 2,555   | 2,676   | 2,945   | 3,928   | 5,904   | 7,636   | 10,533  | 2,185   | 1,711      | 2,008  | 9,0122    |
| 1,2500                  | 0,868  | 2,400  | 3,302   | 3,461   | 3,827   | 5,111   | 7,605   | 9,756   | 13,363  | 2,846   | 2,229      | 2,596  | 11,265    |
| 1,6000                  | 1,199  | 3,344  | 4,506   | 4,722   | 5,241   | 6,980   | 10,236  | 13,004  | 17,610  | 3,919   | 3,080      | 3,557  | 14,420    |
| 2,0000                  | 1,665  | 4,506  | 6,095   | 6,387   | 7,090   | 9,381   | 13,554  | 17,063  | 22,813  | 5,356   | 4,238      | 4,851  | 18,024    |
| 2,5000                  | 2,389  | 6,230  | 8,386   | 8,793   | 9,723   | 12,739  | 18,113  | 22,575  | 29,781  | 7,456   | 5,958      | 6,763  | 22,530    |
| 3,2000                  | 3,669  | 9,159  | 12,148  | 12,740  | 13,986  | 18,065  | 25,198  | 31,087  | 40,437  | 10,944  | 8,862      | 9,968  | 28,839    |
| 4,0000                  | 5,505  | 13,254 | 17,232  | 18,053  | 19,672  | 25,049  | 34,344  | 42,011  | 53,999  | 15,688  | 12,866     | 14,357 | 36,049    |
| 5,0000                  | 8,327  | 19,481 | 24,757  | 25,884  | 27,991  | 35,151  | 47,423  | 57,521  | 73,030  | 22,718  | 18,851     | 20,897 | 45,061    |
| 6,0000                  | 11,697 | 26,894 | 33,547  | 35,019  | 37,658  | 46,774  | 62,333  | 75,117  | 94,429  | 30,939  | 25,883     | 28,573 | 54,073    |
| 7,0000                  | 15,585 | 35,452 | 43,558  | 45,415  | 48,644  | 59,889  | 79,063  | 94,761  | 118,238 | 40,313  | 33,924     | 37,339 | 63,085    |
| 8,0000                  | 19,971 | 45,131 | 54,756  | 57,026  | 60,931  | 74,476  | 97,607  | 116,440 | 144,404 | 50,810  | 42,950     | 47,151 | 72,098    |
| 9,0000                  | 24,849 | 50,888 | 67,123  | 69,839  | 74,485  | 90,521  | 117,984 | 140,178 | 172,912 | 62,418  | 52,950     | 58,000 | 81,110    |
| 10,0000                 | 30,210 | 67,658 | 80,627  | 83,823  | 89,267  | 108,002 | 140,136 | 165,950 | 203,749 | 75,122  | 63,909     | 69,865 | 90,122    |
| 11,0000                 | 36,045 | 80,410 | 95,226  | 98,943  | 105,248 | 126,901 | 164,020 | 193,726 | 236,932 | 88,895  | 75,807     | 82,716 | 99,134    |
| 12,0000                 | 42,353 | 94,135 | 110,904 | 115,180 | 122,410 | 147,197 | 189,598 | 223,458 | 272,429 | 103,720 | 88,631     | 96,537 | 108,15    |

Т а б л и ц а 42.9. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов  ${}^1_5B^+$  [1]  
 $E_m$  — энергия на единицу массы налетающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zc    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                  | 2,222 | 1,838 | 1,347 | 0,896 | 0,727 | 0,660 | 0,611 | 0,566 | 0,360 | 0,308 | 0,283 | 0,242 | 0,1376    |
| 0,0160                  | 2,514 | 2,080 | 1,524 | 1,013 | 0,823 | 0,747 | 0,692 | 0,640 | 0,407 | 0,348 | 0,320 | 0,274 | 0,1761    |
| 0,0200                  | 2,811 | 2,325 | 1,703 | 1,133 | 0,920 | 0,835 | 0,773 | 0,715 | 0,455 | 0,389 | 0,358 | 0,307 | 0,2202    |
| 0,0250                  | 3,142 | 2,600 | 1,904 | 1,266 | 1,028 | 0,933 | 0,865 | 0,800 | 0,508 | 0,435 | 0,401 | 0,343 | 0,2752    |
| 0,0320                  | 3,551 | 2,943 | 2,155 | 1,433 | 1,166 | 1,060 | 0,978 | 0,905 | 0,575 | 0,493 | 0,455 | 0,390 | 0,3523    |
| 0,0400                  | 3,940 | 3,281 | 2,397 | 1,599 | 1,304 | 1,189 | 1,095 | 1,014 | 0,645 | 0,555 | 0,510 | 0,439 | 0,4404    |
| 0,0500                  | 4,341 | 3,638 | 2,650 | 1,776 | 1,455 | 1,325 | 1,222 | 1,132 | 0,718 | 0,624 | 0,575 | 0,494 | 0,5504    |
| 0,0600                  | 4,668 | 3,950 | 2,860 | 1,928 | 1,584 | 1,439 | 1,330 | 1,233 | 0,789 | 0,686 | 0,634 | 0,545 | 0,6605    |
| 0,0700                  | 4,932 | 4,218 | 3,035 | 2,058 | 1,700 | 1,542 | 1,426 | 1,323 | 0,850 | 0,744 | 0,689 | 0,592 | 0,7706    |
| 0,0800                  | 5,145 | 4,458 | 3,180 | 2,172 | 1,797 | 1,628 | 1,504 | 1,399 | 0,906 | 0,795 | 0,735 | 0,633 | 0,8807    |
| 0,0900                  | 5,317 | 4,667 | 3,300 | 2,271 | 1,881 | 1,710 | 1,574 | 1,465 | 0,960 | 0,840 | 0,779 | 0,672 | 0,9900    |
| 0,1000                  | 5,457 | 4,852 | 3,400 | 2,356 | 1,958 | 1,775 | 1,632 | 1,527 | 1,006 | 0,881 | 0,816 | 0,704 | 1,1076    |
| 0,1250                  | 5,689 | 5,249 | 3,578 | 2,519 | 2,104 | 1,907 | 1,753 | 1,642 | 1,100 | 0,963 | 0,900 | 0,778 | 1,3761    |
| 0,1600                  | 5,830 | 5,667 | 3,716 | 2,661 | 2,237 | 2,029 | 1,862 | 1,746 | 1,189 | 1,044 | 0,979 | 0,855 | 1,7614    |
| 0,2000                  | 5,861 | 5,948 | 3,786 | 2,753 | 2,329 | 2,109 | 1,935 | 1,814 | 1,257 | 1,109 | 1,041 | 0,909 | 2,2018    |
| 0,2500                  | 5,806 | 6,108 | 3,813 | 2,817 | 2,394 | 2,173 | 1,990 | 1,864 | 1,315 | 1,163 | 1,090 | 0,953 | 2,7521    |
| 0,3200                  | 5,672 | 6,163 | 3,802 | 2,863 | 2,445 | 2,232 | 2,034 | 1,901 | 1,361 | 1,209 | 1,135 | 0,998 | 3,5229    |



| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е. м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zc    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,4000                 | 5,506 | 6,112 | 3,766 | 2,870 | 2,470 | 2,260 | 2,060 | 1,924 | 1,401 | 1,247 | 1,171 | 1,028 | 4,4036    |
| 0,5000                 | 5,309 | 5,966 | 3,713 | 2,870 | 2,487 | 2,283 | 2,079 | 1,938 | 1,433 | 1,277 | 1,201 | 1,058 | 5,5045    |
| 0,6000                 | 5,091 | 5,733 | 3,631 | 2,843 | 2,476 | 2,280 | 2,070 | 1,928 | 1,442 | 1,289 | 1,215 | 1,078 | 6,6054    |
| 0,7000                 | 4,894 | 5,494 | 3,549 | 2,804 | 2,452 | 2,261 | 2,048 | 1,909 | 1,441 | 1,288 | 1,217 | 1,079 | 7,7063    |
| 0,8000                 | 4,707 | 5,248 | 3,466 | 2,762 | 2,423 | 2,243 | 2,028 | 1,889 | 1,435 | 1,289 | 1,217 | 1,081 | 8,8072    |
| 0,9000                 | 4,540 | 5,017 | 3,383 | 2,713 | 2,392 | 2,219 | 2,003 | 1,864 | 1,431 | 1,286 | 1,214 | 1,083 | 9,9081    |
| 1,0000                 | 4,379 | 4,795 | 3,300 | 2,670 | 2,356 | 2,188 | 1,977 | 1,838 | 1,419 | 1,277 | 1,208 | 1,079 | 11,009    |
| 1,2500                 | 4,015 | 4,300 | 3,096 | 2,538 | 2,260 | 2,105 | 1,898 | 1,761 | 1,384 | 1,248 | 1,179 | 1,056 | 13,761    |
| 1,6000                 | 3,577 | 3,749 | 2,825 | 2,359 | 2,108 | 1,969 | 1,774 | 1,639 | 1,314 | 1,190 | 1,125 | 1,009 | 17,614    |
| 2,0000                 | 3,159 | 3,297 | 2,550 | 2,160 | 1,941 | 1,821 | 1,632 | 1,512 | 1,224 | 1,117 | 1,056 | 0,951 | 22,018    |
| 2,5000                 | 2,741 | 2,872 | 2,260 | 1,941 | 1,756 | 1,650 | 1,476 | 1,369 | 1,125 | 1,024 | 0,972 | 0,881 | 27,522    |
| 3,2000                 | 2,309 | 2,439 | 1,942 | 1,689 | 1,538 | 1,447 | 1,297 | 1,200 | 1,002 | 0,916 | 0,870 | 0,790 | 35,229    |
| 4,0000                 | 1,955 | 2,082 | 1,671 | 1,469 | 1,345 | 1,267 | 1,141 | 1,053 | 0,891 | 0,816 | 0,777 | 0,707 | 44,036    |
| 5,0000                 | 1,644 | 1,763 | 1,425 | 1,263 | 1,163 | 1,097 | 0,989 | 0,915 | 0,784 | 0,715 | 0,685 | 0,626 | 55,045    |
| 6,0000                 | 1,424 | 1,531 | 1,245 | 1,110 | 1,024 | 0,971 | 0,876 | 0,810 | 0,694 | 0,641 | 0,614 | 0,564 | 66,054    |
| 7,0000                 | 1,255 | 1,356 | 1,107 | 0,992 | 0,916 | 0,871 | 0,788 | 0,729 | 0,631 | 0,580 | 0,557 | 0,512 | 77,033    |
| 8,0000                 | 1,125 | 1,218 | 0,998 | 0,898 | 0,831 | 0,791 | 0,719 | 0,664 | 0,577 | 0,532 | 0,511 | 0,471 | 88,072    |
| 9,0000                 | 1,022 | 1,106 | 0,910 | 0,822 | 0,762 | 0,725 | 0,660 | 0,611 | 0,532 | 0,492 | 0,472 | 0,437 | 99,081    |
| 10,0000                | 0,936 | 1,013 | 0,838 | 0,760 | 0,704 | 0,671 | 0,611 | 0,567 | 0,494 | 0,458 | 0,441 | 0,408 | 110,09    |
| 11,0000                | 0,865 | 0,937 | 0,776 | 0,706 | 0,655 | 0,625 | 0,569 | 0,530 | 0,463 | 0,430 | 0,415 | 0,383 | 121,10    |
| 12,0000                | 0,804 | 0,871 | 0,724 | 0,660 | 0,613 | 0,586 | 0,534 | 0,498 | 0,435 | 0,405 | 0,391 | 0,361 | 132,11    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е. м. | H      | He    | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода  | $E$ , МэВ |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|-------|-----------|
| 0,0125                 | 5,050  | 2,155 | 1,427 | 1,341 | 1,192 | 0,786 | 0,482 | 0,342 | 0,226 | 1,806  | 2,297      | 1,753 | 0,1376    |
| 0,0160                 | 5,607  | 2,365 | 1,589 | 1,495 | 1,329 | 0,897 | 0,556 | 0,396 | 0,263 | 2,031  | 2,584      | 1,952 | 0,1761    |
| 0,0200                 | 6,098  | 2,504 | 1,732 | 1,632 | 1,460 | 1,014 | 0,632 | 0,460 | 0,308 | 2,252  | 2,863      | 2,128 | 0,2202    |
| 0,0250                 | 6,628  | 2,630 | 1,889 | 1,781 | 1,611 | 1,156 | 0,739 | 0,539 | 0,390 | 2,495  | 3,175      | 2,320 | 0,2752    |
| 0,0320                 | 7,347  | 2,788 | 2,066 | 1,967 | 1,797 | 1,347 | 0,875 | 0,659 | 0,459 | 2,801  | 3,572      | 2,564 | 0,3523    |
| 0,0400                 | 8,029  | 2,919 | 2,236 | 2,152 | 1,982 | 1,548 | 1,026 | 0,786 | 0,558 | 3,104  | 3,959      | 2,804 | 0,4404    |
| 0,0500                 | 8,772  | 3,085 | 2,435 | 2,369 | 2,205 | 1,778 | 1,198 | 0,933 | 0,676 | 3,429  | 4,373      | 3,079 | 0,5504    |
| 0,0600                 | 9,553  | 3,269 | 2,651 | 2,563 | 2,423 | 1,993 | 1,356 | 1,067 | 0,784 | 3,721  | 4,751      | 3,341 | 0,6605    |
| 0,0700                 | 10,288 | 3,484 | 2,853 | 2,771 | 2,628 | 2,191 | 1,493 | 1,187 | 0,877 | 3,988  | 5,086      | 3,605 | 0,7706    |
| 0,0800                 | 11,035 | 3,705 | 2,056 | 2,970 | 2,827 | 2,376 | 1,628 | 1,297 | 0,964 | 4,236  | 5,397      | 3,867 | 0,8807    |
| 0,0900                 | 11,717 | 3,931 | 3,251 | 3,168 | 3,017 | 2,545 | 1,749 | 1,399 | 1,036 | 4,462  | 5,674      | 4,119 | 0,9908    |
| 0,1000                 | 12,444 | 4,175 | 3,461 | 3,352 | 3,189 | 2,703 | 1,867 | 1,486 | 1,102 | 4,668  | 5,936      | 4,362 | 1,1009    |
| 0,1250                 | 14,206 | 4,741 | 3,918 | 3,775 | 3,607 | 3,045 | 2,097 | 1,671 | 1,242 | 5,131  | 6,530      | 4,934 | 1,3761    |
| 0,1600                 | 16,461 | 5,488 | 4,504 | 4,340 | 4,117 | 3,430 | 2,352 | 1,873 | 1,390 | 5,674  | 7,209      | 5,685 | 1,7614    |
| 0,2000                 | 18,590 | 6,172 | 5,055 | 4,854 | 4,589 | 3,729 | 2,537 | 2,014 | 1,488 | 6,111  | 7,754      | 6,380 | 2,2018    |
| 0,2500                 | 20,664 | 6,840 | 5,547 | 5,341 | 4,987 | 3,942 | 2,665 | 2,089 | 1,536 | 6,458  | 8,185      | 7,046 | 2,7522    |
| 0,3200                 | 22,583 | 7,372 | 5,995 | 5,722 | 5,235 | 4,011 | 2,676 | 2,087 | 1,525 | 6,699  | 8,508      | 7,596 | 3,5229    |
| 0,4000                 | 23,499 | 7,758 | 6,161 | 5,856 | 5,302 | 3,958 | 2,617 | 2,037 | 1,484 | 6,752  | 8,598      | 7,818 | 4,4036    |
| 0,5000                 | 23,686 | 7,871 | 6,115 | 5,818 | 5,205 | 3,828 | 2,525 | 1,971 | 1,437 | 6,657  | 8,498      | 7,804 | 5,5045    |
| 0,6000                 | 23,057 | 7,734 | 5,853 | 5,563 | 4,971 | 3,635 | 2,411 | 1,881 | 1,376 | 6,398  | 8,210      | 7,505 | 6,6054    |
| 0,7000                 | 21,790 | 7,488 | 5,508 | 5,235 | 4,684 | 3,421 | 2,289 | 1,782 | 1,317 | 6,086  | 7,822      | 7,073 | 7,7063    |
| 0,8000                 | 20,346 | 7,140 | 5,161 | 4,922 | 4,398 | 3,216 | 2,177 | 1,698 | 1,262 | 5,767  | 7,403      | 6,634 | 8,8072    |
| 0,9000                 | 18,945 | 6,752 | 4,838 | 4,611 | 4,100 | 3,024 | 2,064 | 1,631 | 1,211 | 5,463  | 7,006      | 6,204 | 9,9081    |
| 1,0000                 | 17,787 | 6,432 | 4,590 | 4,356 | 3,881 | 2,874 | 1,980 | 1,577 | 1,171 | 5,191  | 6,649      | 5,848 | 11,009    |
| 1,2500                 | 15,386 | 5,761 | 4,102 | 3,916 | 3,480 | 2,610 | 1,833 | 1,480 | 1,118 | 4,634  | 5,885      | 5,191 | 13,761    |
| 1,6000                 | 12,771 | 5,001 | 3,611 | 3,453 | 3,091 | 2,359 | 1,692 | 1,376 | 1,065 | 4,026  | 5,038      | 4,487 | 17,614    |
| 2,0000                 | 10,557 | 4,327 | 3,208 | 3,055 | 2,764 | 2,147 | 1,568 | 1,288 | 1,012 | 3,519  | 4,335      | 3,889 | 22,018    |
| 2,5000                 | 8,542  | 3,672 | 2,805 | 2,669 | 2,463 | 1,948 | 1,446 | 1,205 | 0,958 | 3,042  | 3,681      | 3,322 | 27,522    |
| 3,2000                 | 6,796  | 3,019 | 2,394 | 2,285 | 2,122 | 1,718 | 1,307 | 1,087 | 0,872 | 2,569  | 3,062      | 2,786 | 35,229    |
| 4,0000                 | 5,515  | 2,493 | 2,039 | 1,955 | 1,838 | 1,504 | 1,153 | 0,971 | 0,785 | 2,182  | 2,572      | 2,351 | 44,036    |
| 5,0000                 | 4,532  | 2,059 | 1,723 | 1,659 | 1,563 | 1,295 | 1,007 | 0,851 | 0,698 | 1,844  | 2,159      | 1,978 | 55,045    |
| 6,0000                 | 3,871  | 1,760 | 1,496 | 1,439 | 1,363 | 1,138 | 0,889 | 0,755 | 0,622 | 1,598  | 1,866      | 1,709 | 66,054    |
| 7,0000                 | 3,398  | 1,543 | 1,326 | 1,278 | 1,209 | 1,016 | 0,799 | 0,682 | 0,563 | 1,416  | 1,648      | 1,514 | 77,063    |
| 8,0000                 | 3,034  | 1,373 | 1,193 | 1,151 | 1,087 | 0,917 | 0,722 | 0,619 | 0,514 | 1,272  | 1,477      | 1,361 | 88,072    |
| 9,0000                 | 2,740  | 1,245 | 1,084 | 1,047 | 0,990 | 0,837 | 0,660 | 0,567 | 0,473 | 1,154  | 1,339      | 1,235 | 99,081    |
| 10,0000                | 2,504  | 1,143 | 0,997 | 0,963 | 0,911 | 0,771 | 0,609 | 0,523 | 0,438 | 1,059  | 1,226      | 1,134 | 110,09    |
| 11,0000                | 2,306  | 1,057 | 0,925 | 0,893 | 0,845 | 0,714 | 0,566 | 0,487 | 0,408 | 0,979  | 1,133      | 1,050 | 121,10    |
| 12,0000                | 2,136  | 0,984 | 0,862 | 0,833 | 0,788 | 0,666 | 0,529 | 0,455 | 0,382 | 0,911  | 1,052      | 0,977 | 132,11    |



Таблица 42.10. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов бора  $^{11}\text{B}^+$  в различных веществах [1]  
 $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al      | Ti      | Ni      | Ge      | Zr      | Ag      | Eu      | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,0125                | 0,082  | 0,093  | 0,130   | 0,199   | 0,237   | 0,278   | 0,307   | 0,341   | 0,535   | 0,633   | 0,691   | 0,824   | 0,1376    |
| 0,0160                | 0,097  | 0,111  | 0,155   | 0,236   | 0,282   | 0,329   | 0,361   | 0,400   | 0,627   | 0,740   | 0,808   | 0,961   | 0,1761    |
| 0,0200                | 0,113  | 0,130  | 0,181   | 0,274   | 0,329   | 0,381   | 0,418   | 0,461   | 0,722   | 0,851   | 0,929   | 1,103   | 0,2202    |
| 0,0250                | 0,131  | 0,152  | 0,210   | 0,318   | 0,382   | 0,440   | 0,481   | 0,530   | 0,829   | 0,977   | 1,065   | 1,263   | 0,2752    |
| 0,0320                | 0,154  | 0,179  | 0,247   | 0,373   | 0,449   | 0,514   | 0,562   | 0,617   | 0,965   | 1,135   | 1,237   | 1,463   | 0,3523    |
| 0,0400                | 0,177  | 0,206  | 0,285   | 0,429   | 0,517   | 0,590   | 0,644   | 0,706   | 1,104   | 1,297   | 1,413   | 1,668   | 0,4404    |
| 0,0500                | 0,203  | 0,238  | 0,328   | 0,493   | 0,595   | 0,676   | 0,737   | 0,806   | 1,261   | 1,478   | 1,610   | 1,898   | 0,5504    |
| 0,0600                | 0,227  | 0,266  | 0,367   | 0,551   | 0,666   | 0,754   | 0,821   | 0,897   | 1,404   | 1,643   | 1,788   | 2,105   | 0,6605    |
| 0,0700                | 0,250  | 0,293  | 0,404   | 0,606   | 0,732   | 0,827   | 0,900   | 0,982   | 1,536   | 1,794   | 1,951   | 2,295   | 0,7706    |
| 0,0800                | 0,272  | 0,318  | 0,439   | 0,657   | 0,794   | 0,895   | 0,974   | 1,062   | 1,659   | 1,935   | 2,103   | 2,472   | 0,8807    |
| 0,0900                | 0,293  | 0,342  | 0,473   | 0,707   | 0,854   | 0,961   | 1,045   | 1,139   | 1,776   | 2,069   | 2,246   | 2,649   | 0,9908    |
| 0,1000                | 0,313  | 0,365  | 0,506   | 0,754   | 0,911   | 1,024   | 1,114   | 1,212   | 1,887   | 2,197   | 2,384   | 2,800   | 1,1009    |
| 0,1250                | 0,363  | 0,420  | 0,585   | 0,867   | 1,046   | 1,173   | 1,276   | 1,386   | 2,148   | 2,495   | 2,705   | 3,172   | 1,3761    |
| 0,1600                | 0,429  | 0,490  | 0,690   | 1,015   | 1,223   | 1,369   | 1,489   | 1,613   | 2,485   | 2,879   | 3,115   | 3,643   | 1,7614    |
| 0,2000                | 0,505  | 0,566  | 0,808   | 1,178   | 1,416   | 1,582   | 1,721   | 1,860   | 2,844   | 3,288   | 3,550   | 4,142   | 2,2018    |
| 0,2500                | 0,599  | 0,657  | 0,952   | 1,375   | 1,649   | 1,838   | 2,001   | 2,159   | 3,272   | 3,772   | 4,066   | 4,733   | 2,7522    |
| 0,3200                | 0,733  | 0,783  | 1,155   | 1,647   | 1,967   | 2,188   | 2,384   | 2,568   | 3,847   | 4,421   | 4,758   | 5,522   | 3,5229    |
| 0,4000                | 0,891  | 0,926  | 1,387   | 1,954   | 2,326   | 2,580   | 2,814   | 3,028   | 4,485   | 5,138   | 5,522   | 6,391   | 4,4036    |
| 0,5000                | 1,094  | 1,109  | 1,682   | 2,337   | 2,770   | 3,065   | 3,346   | 3,598   | 5,262   | 6,011   | 6,450   | 7,447   | 5,5045    |
| 0,6000                | 1,306  | 1,297  | 1,981   | 2,723   | 3,213   | 3,547   | 3,877   | 4,168   | 6,028   | 6,869   | 7,361   | 8,477   | 6,6054    |
| 0,7000                | 1,527  | 1,493  | 2,288   | 3,113   | 3,660   | 4,032   | 4,411   | 4,742   | 6,792   | 7,723   | 8,267   | 9,498   | 7,7063    |
| 0,8000                | 1,756  | 1,698  | 2,602   | 3,508   | 4,112   | 4,521   | 4,952   | 5,321   | 7,557   | 8,577   | 9,171   | 10,517  | 8,8072    |
| 0,9000                | 1,994  | 1,913  | 2,924   | 3,910   | 4,569   | 5,014   | 5,498   | 5,908   | 8,325   | 9,432   | 10,077  | 11,534  | 9,9081    |
| 1,0000                | 2,241  | 2,137  | 3,253   | 4,319   | 5,033   | 5,514   | 6,051   | 6,503   | 9,050   | 10,291  | 10,986  | 12,553  | 11,009    |
| 1,2500                | 2,897  | 2,743  | 4,114   | 5,377   | 6,225   | 6,796   | 7,472   | 8,032   | 11,061  | 12,471  | 13,291  | 15,131  | 13,761    |
| 1,6000                | 3,915  | 3,703  | 5,417   | 6,951   | 7,991   | 8,689   | 9,572   | 10,300  | 13,919  | 15,634  | 16,637  | 18,864  | 17,614    |
| 2,0000                | 5,226  | 4,957  | 7,059   | 8,903   | 10,169  | 11,016  | 12,161  | 13,099  | 17,393  | 19,455  | 20,680  | 23,361  | 22,018    |
| 2,5000                | 7,099  | 6,749  | 9,355   | 11,595  | 13,155  | 14,196  | 15,713  | 16,929  | 22,088  | 24,609  | 26,120  | 29,379  | 27,522    |
| 3,2000                | 10,171 | 9,668  | 13,044  | 15,861  | 17,856  | 19,196  | 21,296  | 22,955  | 29,361  | 32,581  | 34,519  | 38,631  | 35,229    |
| 4,0000                | 14,329 | 13,588 | 17,947  | 21,467  | 23,995  | 25,719  | 28,553  | 30,811  | 38,706  | 42,792  | 45,256  | 50,442  | 44,036    |
| 5,0000                | 20,491 | 19,355 | 25,105  | 29,577  | 32,825  | 35,087  | 38,947  | 42,063  | 51,920  | 57,249  | 60,384  | 67,044  | 55,045    |
| 6,0000                | 27,704 | 26,073 | 33,392  | 38,899  | 42,937  | 45,778  | 50,801  | 54,880  | 66,877  | 73,542  | 77,396  | 85,620  | 66,054    |
| 7,0000                | 35,955 | 33,730 | 42,790  | 49,410  | 54,320  | 57,772  | 64,073  | 69,225  | 83,536  | 91,629  | 96,264  | 106,135 | 77,063    |
| 8,0000                | 45,234 | 42,310 | 53,279  | 61,090  | 66,950  | 71,057  | 78,722  | 85,069  | 101,808 | 113,474 | 116,930 | 128,568 | 88,072    |
| 9,0000                | 55,513 | 51,808 | 64,842  | 73,916  | 80,797  | 85,610  | 94,725  | 102,378 | 121,692 | 133,025 | 139,359 | 152,858 | 99,081    |
| 10,0000               | 66,777 | 62,217 | 77,463  | 87,862  | 95,849  | 101,406 | 112,085 | 121,103 | 143,173 | 156,245 | 163,489 | 178,960 | 110,09    |
| 11,0000               | 79,021 | 73,524 | 91,128  | 102,902 | 112,077 | 118,422 | 130,777 | 141,196 | 166,215 | 181,065 | 189,220 | 206,844 | 121,10    |
| 12,0000               | 92,230 | 85,719 | 105,822 | 119,031 | 129,455 | 136,629 | 150,768 | 162,631 | 190,765 | 207,444 | 216,556 | 236,498 | 132,11    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H     | He    | N     | C     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(\text{CF}_3)_n$ | Вода  | $E$ , МэВ |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------------|-------|-----------|
| 0,0125                | 0,030 | 0,077 | 0,113 | 0,120 | 0,135 | 0,211 | 0,362 | 0,533 | 0,832 | 0,090  | 0,070             | 0,088 | 0,1376    |
| 0,0160                | 0,036 | 0,093 | 0,137 | 0,145 | 0,162 | 0,253 | 0,429 | 0,627 | 0,974 | 0,109  | 0,085             | 0,107 | 0,1761    |
| 0,0200                | 0,043 | 0,110 | 0,162 | 0,171 | 0,192 | 0,295 | 0,497 | 0,722 | 1,116 | 0,128  | 0,100             | 0,127 | 0,2202    |
| 0,0250                | 0,052 | 0,131 | 0,191 | 0,202 | 0,226 | 0,343 | 0,572 | 0,825 | 1,265 | 0,150  | 0,118             | 0,150 | 0,2752    |
| 0,0320                | 0,062 | 0,159 | 0,228 | 0,242 | 0,269 | 0,402 | 0,664 | 0,949 | 1,438 | 0,179  | 0,140             | 0,181 | 0,3523    |
| 0,0400                | 0,073 | 0,189 | 0,268 | 0,283 | 0,314 | 0,461 | 0,754 | 1,067 | 1,606 | 0,208  | 0,163             | 0,213 | 0,4404    |
| 0,0500                | 0,086 | 0,225 | 0,314 | 0,331 | 0,365 | 0,526 | 0,850 | 1,192 | 1,780 | 0,241  | 0,189             | 0,249 | 0,5504    |
| 0,0600                | 0,098 | 0,259 | 0,356 | 0,374 | 0,412 | 0,584 | 0,935 | 1,300 | 1,929 | 0,271  | 0,212             | 0,283 | 0,6605    |
| 0,0700                | 0,109 | 0,291 | 0,396 | 0,415 | 0,455 | 0,636 | 1,011 | 1,397 | 2,060 | 0,299  | 0,235             | 0,314 | 0,7706    |
| 0,0800                | 0,119 | 0,321 | 0,432 | 0,453 | 0,495 | 0,684 | 1,082 | 1,485 | 2,179 | 0,326  | 0,256             | 0,343 | 0,8807    |
| 0,0900                | 0,129 | 0,350 | 0,467 | 0,489 | 0,533 | 0,728 | 1,147 | 1,567 | 2,289 | 0,351  | 0,275             | 0,371 | 0,9908    |
| 0,1000                | 0,138 | 0,377 | 0,500 | 0,523 | 0,568 | 0,770 | 1,208 | 1,643 | 2,392 | 0,376  | 0,294             | 0,397 | 1,1009    |
| 0,1250                | 0,158 | 0,439 | 0,575 | 0,600 | 0,649 | 0,866 | 1,347 | 1,818 | 2,627 | 0,432  | 0,339             | 0,456 | 1,3761    |
| 0,1600                | 0,184 | 0,514 | 0,666 | 0,695 | 0,749 | 0,985 | 1,520 | 2,035 | 2,920 | 0,503  | 0,395             | 0,528 | 1,7614    |
| 0,2000                | 0,209 | 0,590 | 0,758 | 0,790 | 0,850 | 1,108 | 1,700 | 2,261 | 3,226 | 0,578  | 0,453             | 0,601 | 2,2018    |
| 0,2500                | 0,237 | 0,674 | 0,862 | 0,898 | 0,965 | 1,251 | 1,911 | 2,530 | 3,589 | 0,665  | 0,522             | 0,683 | 2,7522    |
| 0,3200                | 0,272 | 0,783 | 0,996 | 1,038 | 1,115 | 1,445 | 2,199 | 2,898 | 4,092 | 0,782  | 0,615             | 0,789 | 3,5229    |
| 0,4000                | 0,311 | 0,899 | 1,141 | 1,190 | 1,283 | 1,666 | 2,532 | 3,325 | 4,678 | 0,913  | 0,718             | 0,903 | 4,4036    |
| 0,5000                | 0,357 | 1,040 | 1,320 | 1,378 | 1,492 | 1,949 | 2,960 | 3,875 | 5,432 | 1,077  | 0,846             | 1,044 | 5,5045    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar      | Kr      | Xe      | Rn      | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|------------|--------|-----------|
| 0,6000                | 0,404  | 1,181  | 1,504  | 1,572  | 1,709  | 2,244   | 3,407   | 4,446   | 6,215   | 1,246  | 0,978      | 1,188  | 6,6054    |
| 0,7000                | 0,453  | 1,326  | 1,698  | 1,776  | 1,937  | 2,556   | 3,875   | 5,048   | 7,033   | 1,422  | 1,116      | 1,339  | 7,7063    |
| 0,8000                | 0,506  | 1,476  | 1,904  | 1,993  | 2,179  | 2,888   | 4,368   | 5,681   | 7,887   | 1,608  | 1,260      | 1,500  | 8,8072    |
| 0,9000                | 0,562  | 1,635  | 2,125  | 2,224  | 2,438  | 3,241   | 4,888   | 6,342   | 8,777   | 1,804  | 1,413      | 1,671  | 9,9081    |
| 1,0000                | 0,622  | 1,802  | 2,358  | 2,470  | 2,714  | 3,615   | 5,433   | 7,029   | 9,702   | 2,011  | 1,574      | 1,854  | 11,009    |
| 1,2500                | 0,788  | 2,254  | 2,993  | 3,136  | 3,464  | 4,620   | 6,877   | 8,830   | 12,107  | 2,572  | 2,014      | 2,354  | 13,761    |
| 1,6000                | 1,063  | 2,973  | 3,994  | 4,184  | 4,639  | 6,173   | 9,066   | 11,531  | 15,638  | 3,465  | 2,723      | 3,152  | 17,614    |
| 2,0000                | 1,443  | 3,920  | 5,289  | 5,542  | 6,147  | 8,131   | 11,770  | 14,840  | 19,879  | 4,636  | 3,666      | 4,208  | 22,018    |
| 2,5000                | 2,024  | 5,303  | 7,127  | 7,472  | 8,259  | 10,826  | 15,429  | 19,263  | 25,472  | 6,321  | 5,046      | 5,742  | 27,522    |
| 3,2000                | 3,039  | 7,625  | 10,110 | 10,601 | 11,638 | 15,047  | 21,045  | 26,010  | 33,918  | 9,086  | 7,348      | 8,282  | 35,229    |
| 4,0000                | 4,482  | 10,845 | 14,108 | 14,780 | 16,110 | 20,540  | 28,238  | 34,601  | 44,585  | 12,816 | 10,497     | 11,734 | 44,036    |
| 5,0000                | 6,693  | 15,722 | 20,002 | 20,914 | 22,626 | 28,453  | 38,482  | 46,751  | 59,491  | 18,323 | 15,185     | 16,857 | 55,045    |
| 6,0000                | 9,329  | 21,521 | 26,877 | 28,058 | 30,188 | 37,544  | 50,145  | 60,514  | 76,320  | 24,753 | 20,685     | 22,861 | 66,054    |
| 7,0000                | 12,370 | 28,216 | 34,709 | 36,191 | 38,782 | 47,803  | 63,232  | 75,881  | 94,854  | 32,087 | 26,976     | 29,718 | 77,063    |
| 8,0000                | 15,804 | 35,793 | 43,476 | 45,281 | 48,401 | 59,223  | 77,750  | 92,852  | 115,339 | 40,304 | 34,042     | 37,400 | 88,072    |
| 9,0000                | 19,627 | 44,224 | 53,168 | 55,323 | 59,024 | 71,798  | 93,721  | 111,457 | 137,682 | 49,402 | 41,879     | 45,902 | 99,081    |
| 10,0000               | 23,834 | 53,460 | 63,765 | 66,298 | 70,624 | 85,517  | 111,105 | 131,683 | 161,883 | 59,372 | 50,480     | 55,213 | 110,09    |
| 11,0000               | 28,420 | 63,482 | 75,238 | 78,180 | 83,183 | 100,369 | 129,874 | 153,510 | 187,959 | 70,195 | 59,830     | 65,313 | 121,10    |
| 12,0000               | 33,384 | 74,283 | 87,576 | 90,957 | 96,689 | 116,341 | 150,003 | 176,908 | 215,894 | 81,862 | 69,922     | 76,189 | 132,11    |

Таблица 42.11. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов углерода  $^{12}_6C^+$  [1] $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Cu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                | 2,558 | 2,116 | 1,550 | 1,031 | 0,837 | 0,760 | 0,704 | 0,651 | 0,414 | 0,354 | 0,326 | 0,279 | 0,1500    |
| 0,0160                | 2,894 | 2,394 | 1,754 | 1,166 | 0,947 | 0,859 | 0,796 | 0,737 | 0,468 | 0,401 | 0,368 | 0,316 | 0,1920    |
| 0,0200                | 3,236 | 2,677 | 1,961 | 1,304 | 1,059 | 0,961 | 0,890 | 0,824 | 0,524 | 0,448 | 0,412 | 0,353 | 0,2400    |
| 0,0250                | 3,618 | 2,993 | 2,192 | 1,458 | 1,184 | 1,074 | 0,995 | 0,921 | 0,585 | 0,501 | 0,462 | 0,395 | 0,3000    |
| 0,0320                | 4,088 | 3,388 | 2,481 | 1,650 | 1,342 | 1,220 | 1,126 | 1,042 | 0,662 | 0,568 | 0,523 | 0,449 | 0,3840    |
| 0,0400                | 4,559 | 3,797 | 2,773 | 1,850 | 1,509 | 1,376 | 1,267 | 1,173 | 0,746 | 0,642 | 0,591 | 0,508 | 0,4800    |
| 0,0500                | 5,042 | 4,226 | 3,078 | 2,062 | 1,690 | 1,539 | 1,419 | 1,314 | 0,834 | 0,725 | 0,668 | 0,574 | 0,6000    |
| 0,0600                | 5,455 | 4,616 | 3,342 | 2,253 | 1,852 | 1,681 | 1,554 | 1,441 | 0,922 | 0,802 | 0,740 | 0,637 | 0,7200    |
| 0,0700                | 5,806 | 4,967 | 3,573 | 2,423 | 2,001 | 1,815 | 1,679 | 1,558 | 1,000 | 0,875 | 0,811 | 0,697 | 0,8400    |
| 0,0800                | 6,108 | 5,293 | 3,775 | 2,578 | 2,133 | 1,933 | 1,786 | 1,661 | 1,076 | 0,944 | 0,872 | 0,751 | 0,9600    |
| 0,0900                | 6,365 | 5,587 | 3,951 | 2,718 | 2,252 | 2,047 | 1,885 | 1,754 | 1,150 | 1,006 | 0,932 | 0,804 | 1,0800    |
| 0,1000                | 6,587 | 5,856 | 4,104 | 2,844 | 2,364 | 2,142 | 1,970 | 1,843 | 1,215 | 1,063 | 0,985 | 0,850 | 1,2000    |
| 0,1250                | 6,991 | 6,450 | 4,397 | 3,095 | 2,585 | 2,344 | 2,155 | 2,018 | 1,352 | 1,183 | 1,106 | 0,956 | 1,5000    |
| 0,1600                | 7,286 | 7,082 | 4,644 | 3,325 | 2,796 | 2,536 | 2,327 | 2,183 | 1,486 | 1,305 | 1,224 | 1,068 | 1,9200    |
| 0,2000                | 7,407 | 7,518 | 4,785 | 3,479 | 2,943 | 2,665 | 2,445 | 2,292 | 1,589 | 1,402 | 1,316 | 1,148 | 2,4000    |
| 0,2500                | 7,402 | 7,786 | 4,860 | 3,592 | 3,052 | 2,770 | 2,537 | 2,377 | 1,677 | 1,482 | 1,390 | 1,215 | 3,0000    |
| 0,3200                | 7,294 | 7,925 | 4,889 | 3,681 | 3,144 | 2,870 | 2,616 | 2,444 | 1,750 | 1,555 | 1,459 | 1,283 | 3,8400    |
| 0,4000                | 7,140 | 7,926 | 4,884 | 3,721 | 3,204 | 2,930 | 2,671 | 2,496 | 1,817 | 1,617 | 1,519 | 1,333 | 4,8000    |
| 0,5000                | 6,950 | 7,810 | 4,860 | 3,757 | 3,256 | 2,989 | 2,722 | 2,537 | 1,876 | 1,672 | 1,572 | 1,385 | 6,0000    |
| 0,6000                | 6,692 | 7,537 | 4,773 | 3,738 | 3,255 | 2,998 | 2,721 | 2,535 | 1,895 | 1,695 | 1,597 | 1,418 | 7,2000    |
| 0,7000                | 6,456 | 7,247 | 4,682 | 3,698 | 3,235 | 2,982 | 2,701 | 2,519 | 1,901 | 1,699 | 1,606 | 1,423 | 8,4000    |
| 0,8000                | 6,229 | 6,944 | 4,587 | 3,655 | 3,206 | 2,967 | 2,683 | 2,500 | 1,899 | 1,706 | 1,610 | 1,431 | 9,6000    |
| 0,9000                | 6,025 | 6,658 | 4,490 | 3,601 | 3,174 | 2,945 | 2,658 | 2,474 | 1,899 | 1,706 | 1,612 | 1,437 | 10,800    |
| 1,0000                | 5,828 | 6,382 | 4,392 | 3,553 | 3,136 | 2,912 | 2,631 | 2,446 | 1,889 | 1,700 | 1,607 | 1,436 | 12,000    |
| 1,2500                | 5,382 | 5,764 | 4,150 | 3,403 | 3,029 | 2,822 | 2,544 | 2,361 | 1,855 | 1,672 | 1,581 | 1,415 | 15,000    |
| 1,6000                | 4,844 | 5,077 | 3,826 | 3,195 | 2,854 | 2,667 | 2,403 | 2,219 | 1,779 | 1,611 | 1,523 | 1,366 | 19,200    |
| 2,0000                | 4,327 | 4,515 | 3,492 | 2,958 | 2,657 | 2,493 | 2,235 | 2,071 | 1,676 | 1,529 | 1,446 | 1,303 | 24,000    |
| 2,5000                | 3,799 | 3,981 | 3,132 | 2,690 | 2,434 | 2,286 | 2,045 | 1,898 | 1,560 | 1,419 | 1,347 | 1,222 | 30,000    |
| 3,2000                | 3,240 | 3,423 | 2,725 | 2,371 | 2,158 | 2,030 | 1,820 | 1,684 | 1,406 | 1,286 | 1,221 | 1,109 | 38,400    |
| 4,0000                | 2,770 | 2,950 | 2,368 | 2,081 | 1,906 | 1,795 | 1,617 | 1,492 | 1,262 | 1,156 | 1,101 | 1,002 | 48,000    |
| 5,0000                | 2,347 | 2,516 | 2,034 | 1,802 | 1,660 | 1,566 | 1,412 | 1,306 | 1,119 | 1,021 | 0,978 | 0,893 | 60,000    |
| 6,0000                | 2,041 | 2,194 | 1,784 | 1,591 | 1,468 | 1,392 | 1,256 | 1,161 | 0,995 | 0,919 | 0,880 | 0,808 | 72,000    |
| 7,0000                | 1,804 | 1,948 | 1,590 | 1,425 | 1,317 | 1,252 | 1,132 | 1,048 | 0,907 | 0,833 | 0,800 | 0,736 | 84,000    |
| 8,0000                | 1,619 | 1,752 | 1,436 | 1,293 | 1,196 | 1,137 | 1,034 | 0,955 | 0,830 | 0,766 | 0,735 | 0,678 | 96,000    |
| 9,0000                | 1,472 | 1,592 | 1,310 | 1,183 | 1,097 | 1,044 | 0,950 | 0,879 | 0,767 | 0,708 | 0,680 | 0,629 | 108,00    |
| 10,0000               | 1,348 | 1,459 | 1,206 | 1,094 | 1,013 | 0,966 | 0,879 | 0,816 | 0,712 | 0,660 | 0,636 | 0,587 | 120,00    |
| 11,0000               | 1,245 | 1,349 | 1,118 | 1,017 | 0,943 | 0,900 | 0,819 | 0,763 | 0,666 | 0,619 | 0,598 | 0,551 | 132,00    |
| 12,0000               | 1,158 | 1,254 | 1,042 | 0,950 | 0,883 | 0,843 | 0,768 | 0,717 | 0,626 | 0,584 | 0,563 | 0,519 | 144,00    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | H      | He     | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(CH_4)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|-------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|--------|-----------|
| 0,0125                  | 5,814  | 2,481  | 1,643 | 1,544 | 1,372 | 0,905 | 0,555 | 0,394 | 0,260 | 2,079  | 2,645      | 2,019  | 0,1500    |
| 0,0160                  | 6,455  | 2,722  | 1,829 | 1,721 | 1,529 | 1,033 | 0,640 | 0,456 | 0,303 | 2,338  | 2,975      | 2,247  | 0,1920    |
| 0,0200                  | 7,020  | 2,883  | 1,994 | 1,879 | 1,681 | 1,167 | 0,728 | 0,529 | 0,354 | 2,592  | 3,296      | 2,449  | 0,2400    |
| 0,0250                  | 7,630  | 3,028  | 2,175 | 2,050 | 1,855 | 1,331 | 0,851 | 0,620 | 0,449 | 2,872  | 3,655      | 2,670  | 0,3000    |
| 0,0320                  | 8,459  | 3,210  | 2,379 | 2,265 | 2,069 | 1,550 | 1,007 | 0,759 | 0,528 | 3,225  | 4,113      | 2,952  | 0,3840    |
| 0,0400                  | 9,291  | 3,378  | 2,587 | 2,490 | 2,294 | 1,792 | 1,187 | 0,910 | 0,646 | 3,591  | 4,582      | 3,245  | 0,4800    |
| 0,0500                  | 10,188 | 3,583  | 2,829 | 2,752 | 2,561 | 2,065 | 1,391 | 1,083 | 0,785 | 3,983  | 5,079      | 3,577  | 0,6000    |
| 0,0600                  | 11,163 | 3,820  | 3,098 | 2,995 | 2,831 | 2,330 | 1,584 | 1,247 | 0,916 | 4,348  | 5,551      | 3,904  | 0,7200    |
| 0,0700                  | 12,113 | 4,102  | 3,359 | 3,262 | 3,094 | 2,580 | 1,758 | 1,397 | 1,033 | 4,695  | 5,989      | 4,245  | 0,8400    |
| 0,0800                  | 13,100 | 4,398  | 3,628 | 3,526 | 3,356 | 2,820 | 1,933 | 1,540 | 1,144 | 5,028  | 6,406      | 4,591  | 0,9600    |
| 0,0900                  | 14,027 | 4,706  | 3,892 | 3,793 | 3,611 | 3,046 | 2,094 | 1,675 | 1,241 | 5,342  | 6,792      | 4,931  | 1,0800    |
| 0,1000                  | 15,021 | 5,040  | 4,178 | 4,047 | 3,850 | 3,263 | 2,253 | 1,793 | 1,330 | 5,635  | 7,166      | 5,265  | 1,2000    |
| 0,1250                  | 17,456 | 5,826  | 4,815 | 4,639 | 4,432 | 3,742 | 2,577 | 2,053 | 1,526 | 6,305  | 8,024      | 6,063  | 1,5000    |
| 0,1600                  | 20,573 | 6,859  | 5,628 | 5,424 | 5,146 | 4,286 | 2,940 | 2,341 | 1,737 | 7,091  | 9,009      | 7,105  | 1,9200    |
| 0,2000                  | 23,495 | 7,800  | 6,388 | 6,135 | 5,800 | 4,713 | 3,206 | 2,546 | 1,881 | 7,723  | 9,800      | 8,063  | 2,4000    |
| 0,2500                  | 26,341 | 8,719  | 7,071 | 6,809 | 6,357 | 5,025 | 3,397 | 2,663 | 1,959 | 8,233  | 10,434     | 8,981  | 3,0000    |
| 0,3200                  | 29,040 | 9,480  | 7,710 | 7,358 | 6,732 | 5,158 | 3,442 | 2,684 | 1,960 | 8,614  | 10,941     | 9,768  | 3,8400    |
| 0,4000                  | 30,475 | 10,061 | 7,990 | 7,594 | 6,876 | 5,133 | 3,394 | 2,642 | 1,924 | 8,757  | 11,150     | 10,139 | 4,8000    |
| 0,5000                  | 31,007 | 10,303 | 8,004 | 7,616 | 6,814 | 5,011 | 3,305 | 2,581 | 1,881 | 8,714  | 11,125     | 10,216 | 6,0000    |
| 0,6000                  | 30,311 | 10,167 | 7,695 | 7,313 | 6,535 | 4,778 | 3,170 | 2,473 | 1,809 | 8,411  | 10,793     | 9,867  | 7,2000    |
| 0,7000                  | 28,745 | 9,878  | 7,266 | 6,905 | 6,180 | 4,513 | 3,020 | 2,350 | 1,737 | 8,029  | 10,318     | 9,330  | 8,4000    |
| 0,8000                  | 26,923 | 9,448  | 6,829 | 6,513 | 5,820 | 4,256 | 2,880 | 2,247 | 1,669 | 7,632  | 9,797      | 8,779  | 9,6000    |
| 0,9000                  | 25,142 | 8,961  | 6,420 | 6,119 | 5,441 | 4,014 | 2,739 | 2,164 | 1,607 | 7,251  | 9,298      | 8,234  | 10,800    |
| 1,0000                  | 23,673 | 8,560  | 6,109 | 5,797 | 5,165 | 3,825 | 2,635 | 2,099 | 1,559 | 6,909  | 8,850      | 7,783  | 12,000    |
| 1,2500                  | 20,623 | 7,722  | 5,498 | 5,249 | 4,664 | 3,498 | 2,457 | 1,984 | 1,498 | 6,212  | 7,888      | 6,959  | 15,000    |
| 1,6000                  | 17,295 | 6,773  | 4,890 | 4,676 | 4,186 | 3,195 | 2,292 | 1,863 | 1,443 | 5,452  | 6,822      | 6,076  | 19,200    |
| 2,0000                  | 14,457 | 5,926  | 4,393 | 4,183 | 3,785 | 2,940 | 2,148 | 1,763 | 1,386 | 4,819  | 5,936      | 5,325  | 24,000    |
| 2,5000                  | 11,839 | 5,090  | 3,887 | 3,699 | 3,414 | 2,700 | 2,005 | 1,669 | 1,328 | 4,216  | 5,102      | 4,604  | 30,000    |
| 3,2000                  | 9,538  | 4,238  | 3,360 | 3,208 | 2,979 | 2,412 | 1,834 | 1,526 | 1,224 | 3,605  | 4,298      | 3,911  | 38,400    |
| 4,0000                  | 7,814  | 3,533  | 2,889 | 2,770 | 2,605 | 2,131 | 1,634 | 1,376 | 1,113 | 3,093  | 3,644      | 3,332  | 48,000    |
| 5,0000                  | 6,468  | 2,939  | 2,459 | 2,368 | 2,231 | 1,849 | 1,438 | 1,214 | 0,997 | 2,632  | 3,081      | 2,823  | 60,000    |
| 6,0000                  | 5,548  | 2,523  | 2,144 | 2,062 | 1,953 | 1,631 | 1,274 | 1,083 | 0,892 | 2,291  | 2,674      | 2,449  | 72,000    |
| 7,0000                  | 4,883  | 2,217  | 1,905 | 1,837 | 1,737 | 1,460 | 1,148 | 0,980 | 0,810 | 2,034  | 2,368      | 2,176  | 84,000    |
| 8,0000                  | 4,366  | 1,975  | 1,716 | 1,656 | 1,564 | 1,320 | 1,038 | 0,890 | 0,740 | 1,830  | 2,126      | 1,958  | 96,000    |
| 9,0000                  | 3,945  | 1,793  | 1,561 | 1,507 | 1,426 | 1,206 | 0,950 | 0,816 | 0,681 | 1,662  | 1,928      | 1,778  | 108,00    |
| 10,0000                 | 3,606  | 1,646  | 1,436 | 1,387 | 1,312 | 1,110 | 0,877 | 0,754 | 0,631 | 1,524  | 1,766      | 1,633  | 120,00    |
| 11,0000                 | 3,320  | 1,522  | 1,331 | 1,285 | 1,216 | 1,028 | 0,815 | 0,701 | 0,587 | 1,409  | 1,631      | 1,511  | 132,00    |
| 12,0000                 | 3,074  | 1,416  | 1,241 | 1,198 | 1,134 | 0,959 | 0,762 | 0,656 | 0,549 | 1,311  | 1,514      | 1,407  | 144,00    |

Таблица 42.12. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов углерода  $^{12}C^{+}$  в различных веществах [1]  
 $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                  | 0,075 | 0,085 | 0,119 | 0,181 | 0,216 | 0,255 | 0,282 | 0,313 | 0,491 | 0,581 | 0,635 | 0,758 | 0,1500    |
| 0,0160                  | 0,089 | 0,102 | 0,143 | 0,216 | 0,258 | 0,302 | 0,332 | 0,368 | 0,576 | 0,681 | 0,744 | 0,886 | 0,1920    |
| 0,0200                  | 0,104 | 0,120 | 0,167 | 0,252 | 0,302 | 0,350 | 0,385 | 0,425 | 0,665 | 0,785 | 0,857 | 1,019 | 0,2400    |
| 0,0250                  | 0,121 | 0,140 | 0,194 | 0,293 | 0,351 | 0,406 | 0,444 | 0,490 | 0,766 | 0,903 | 0,985 | 1,169 | 0,3000    |
| 0,0320                  | 0,143 | 0,165 | 0,229 | 0,345 | 0,414 | 0,476 | 0,520 | 0,572 | 0,893 | 1,051 | 1,146 | 1,357 | 0,3940    |
| 0,0400                  | 0,164 | 0,191 | 0,264 | 0,398 | 0,478 | 0,547 | 0,597 | 0,655 | 1,024 | 1,203 | 1,311 | 1,549 | 0,4800    |
| 0,0500                  | 0,189 | 0,221 | 0,304 | 0,457 | 0,551 | 0,627 | 0,684 | 0,749 | 1,171 | 1,373 | 1,495 | 1,764 | 0,6000    |
| 0,0600                  | 0,212 | 0,247 | 0,341 | 0,512 | 0,617 | 0,700 | 0,763 | 0,834 | 1,304 | 1,526 | 1,661 | 1,957 | 0,7200    |
| 0,0700                  | 0,233 | 0,272 | 0,375 | 0,562 | 0,678 | 0,767 | 0,836 | 0,913 | 1,426 | 1,666 | 1,812 | 2,133 | 0,8400    |
| 0,0800                  | 0,253 | 0,296 | 0,408 | 0,609 | 0,735 | 0,830 | 0,904 | 0,986 | 1,539 | 1,795 | 1,952 | 2,295 | 0,9600    |
| 0,0900                  | 0,272 | 0,318 | 0,439 | 0,655 | 0,789 | 0,891 | 0,968 | 1,056 | 1,645 | 1,916 | 2,083 | 2,447 | 1,0800    |
| 0,1000                  | 0,291 | 0,339 | 0,468 | 0,698 | 0,841 | 0,948 | 1,030 | 1,123 | 1,747 | 2,032 | 2,208 | 2,592 | 1,2000    |
| 0,1250                  | 0,335 | 0,387 | 0,539 | 0,799 | 0,962 | 1,082 | 1,176 | 1,278 | 1,981 | 2,299 | 2,494 | 2,925 | 1,5000    |
| 0,1600                  | 0,394 | 0,449 | 0,631 | 0,929 | 1,118 | 1,253 | 1,363 | 1,478 | 2,276 | 2,636 | 2,854 | 3,339 | 1,9200    |
| 0,2000                  | 0,459 | 0,515 | 0,733 | 1,070 | 1,285 | 1,438 | 1,564 | 1,692 | 2,588 | 2,991 | 3,232 | 3,771 | 2,4000    |
| 0,2500                  | 0,540 | 0,593 | 0,857 | 1,240 | 1,485 | 1,658 | 1,804 | 1,949 | 2,955 | 3,406 | 3,675 | 4,279 | 3,0000    |
| 0,3200                  | 0,654 | 0,700 | 1,030 | 1,471 | 1,756 | 1,956 | 2,130 | 2,297 | 3,445 | 3,959 | 4,264 | 4,951 | 3,8400    |
| 0,4000                  | 0,787 | 0,821 | 1,226 | 1,730 | 2,058 | 2,287 | 2,493 | 2,685 | 3,983 | 4,564 | 4,909 | 5,684 | 4,8000    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al     | Ti     | Ni     | Ge      | Zr      | Ag      | Eu      | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,5000                | 0,957  | 0,974  | 1,472  | 2,051  | 2,429  | 2,692   | 2,938   | 3,162   | 4,633   | 5,294   | 5,685   | 6,567   | 6,0000    |
| 0,6000                | 1,133  | 1,130  | 1,721  | 2,371  | 2,798  | 3,093   | 3,379   | 3,635   | 5,269   | 6,007   | 6,442   | 7,423   | 7,2000    |
| 0,7000                | 1,316  | 1,292  | 1,975  | 2,694  | 3,168  | 3,494   | 3,821   | 4,110   | 5,901   | 6,714   | 7,192   | 8,268   | 8,4000    |
| 0,8000                | 1,505  | 1,462  | 2,234  | 3,020  | 3,540  | 3,898   | 4,267   | 4,589   | 6,533   | 7,419   | 7,938   | 9,109   | 9,6000    |
| 0,9000                | 1,701  | 1,638  | 2,498  | 3,351  | 3,916  | 4,303   | 4,716   | 5,071   | 7,165   | 8,122   | 8,683   | 9,946   | 10,800    |
| 1,0000                | 1,903  | 1,822  | 2,769  | 3,686  | 4,297  | 4,713   | 5,170   | 5,559   | 7,798   | 8,827   | 9,428   | 10,781  | 12,000    |
| 1,2500                | 2,439  | 2,317  | 3,471  | 4,549  | 5,270  | 5,760   | 6,330   | 6,807   | 9,401   | 10,605  | 11,310  | 12,885  | 15,000    |
| 1,6000                | 3,262  | 3,094  | 4,526  | 5,823  | 6,698  | 7,291   | 8,029   | 8,642   | 11,713  | 13,164  | 14,016  | 15,905  | 19,200    |
| 2,0000                | 4,311  | 4,097  | 5,840  | 7,385  | 8,442  | 9,153   | 10,101  | 10,882  | 14,493  | 16,223  | 17,252  | 19,504  | 24,000    |
| 2,5000                | 5,793  | 5,514  | 7,656  | 9,514  | 10,803 | 11,668  | 12,910  | 13,911  | 18,206  | 20,299  | 21,555  | 24,264  | 30,000    |
| 3,2000                | 8,193  | 7,795  | 10,537 | 12,846 | 14,476 | 15,574  | 17,271  | 18,618  | 23,888  | 26,527  | 28,116  | 31,492  | 38,400    |
| 4,0000                | 11,405 | 10,823 | 14,325 | 17,178 | 19,219 | 20,614  | 22,878  | 24,678  | 31,108  | 34,416  | 36,411  | 40,617  | 48,000    |
| 5,0000                | 16,125 | 15,240 | 19,809 | 23,391 | 25,984 | 27,791  | 30,841  | 33,308  | 41,232  | 45,491  | 48,001  | 53,336  | 60,000    |
| 6,0000                | 21,621 | 20,359 | 26,123 | 30,493 | 33,687 | 35,936  | 39,873  | 43,073  | 52,627  | 57,905  | 60,963  | 67,489  | 72,000    |
| 7,0000                | 27,887 | 26,173 | 33,259 | 38,475 | 42,332 | 45,044  | 49,951  | 53,967  | 65,278  | 71,640  | 75,291  | 83,068  | 84,000    |
| 8,0000                | 34,921 | 32,678 | 41,210 | 47,329 | 51,905 | 55,114  | 61,055  | 65,977  | 79,129  | 86,683  | 90,956  | 100,073 | 96,000    |
| 9,0000                | 42,705 | 39,870 | 49,967 | 57,042 | 62,392 | 66,136  | 73,175  | 79,085  | 94,186  | 103,004 | 107,942 | 118,468 | 108,00    |
| 10,0000               | 51,232 | 47,750 | 59,521 | 67,599 | 73,786 | 78,093  | 86,316  | 93,260  | 110,448 | 120,581 | 126,208 | 138,227 | 120,00    |
| 11,0000               | 60,500 | 56,310 | 69,865 | 78,984 | 86,071 | 90,974  | 100,466 | 108,470 | 127,890 | 139,370 | 145,686 | 159,335 | 132,00    |
| 12,0000               | 70,501 | 65,543 | 80,991 | 91,197 | 99,229 | 104,760 | 115,603 | 124,700 | 146,479 | 159,344 | 166,385 | 181,788 | 144,00    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar     | Kr      | Xe      | Rn      | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода   | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|---------------------------------|--------|-----------|
| 0,0125                | 0,027  | 0,070  | 0,103  | 0,109  | 0,122  | 0,192  | 0,330   | 0,487   | 0,762   | 0,082  | 0,064                           | 0,080  | 0,1500    |
| 0,0160                | 0,033  | 0,085  | 0,125  | 0,133  | 0,148  | 0,231  | 0,392   | 0,574   | 0,894   | 0,100  | 0,078                           | 0,097  | 0,1920    |
| 0,0200                | 0,040  | 0,102  | 0,148  | 0,157  | 0,176  | 0,271  | 0,456   | 0,663   | 1,026   | 0,118  | 0,092                           | 0,116  | 0,2400    |
| 0,0250                | 0,048  | 0,121  | 0,175  | 0,186  | 0,207  | 0,315  | 0,526   | 0,760   | 1,166   | 0,139  | 0,108                           | 0,138  | 0,3000    |
| 0,0320                | 0,057  | 0,147  | 0,210  | 0,223  | 0,248  | 0,371  | 0,612   | 0,876   | 1,329   | 0,165  | 0,129                           | 0,167  | 0,3840    |
| 0,0400                | 0,068  | 0,175  | 0,248  | 0,262  | 0,290  | 0,426  | 0,696   | 0,987   | 1,486   | 0,192  | 0,151                           | 0,197  | 0,4800    |
| 0,0500                | 0,080  | 0,209  | 0,291  | 0,306  | 0,338  | 0,487  | 0,787   | 1,104   | 1,649   | 0,223  | 0,175                           | 0,231  | 0,6000    |
| 0,0600                | 0,091  | 0,241  | 0,330  | 0,347  | 0,382  | 0,541  | 0,866   | 1,205   | 1,788   | 0,252  | 0,197                           | 0,262  | 0,7200    |
| 0,0700                | 0,101  | 0,270  | 0,367  | 0,385  | 0,422  | 0,589  | 0,936   | 1,294   | 1,909   | 0,278  | 0,218                           | 0,291  | 0,8400    |
| 0,0800                | 0,110  | 0,298  | 0,401  | 0,420  | 0,458  | 0,633  | 1,000   | 1,376   | 2,019   | 0,302  | 0,237                           | 0,318  | 0,9600    |
| 0,0900                | 0,119  | 0,325  | 0,433  | 0,452  | 0,493  | 0,673  | 1,060   | 1,451   | 2,120   | 0,325  | 0,255                           | 0,343  | 1,0800    |
| 0,1000                | 0,127  | 0,349  | 0,463  | 0,483  | 0,525  | 0,711  | 1,115   | 1,520   | 2,213   | 0,347  | 0,273                           | 0,367  | 1,2000    |
| 0,1250                | 0,146  | 0,405  | 0,529  | 0,552  | 0,597  | 0,797  | 1,239   | 1,676   | 2,424   | 0,397  | 0,312                           | 0,420  | 1,5000    |
| 0,1600                | 0,168  | 0,471  | 0,610  | 0,636  | 0,685  | 0,902  | 1,392   | 1,867   | 2,681   | 0,460  | 0,361                           | 0,483  | 1,9200    |
| 0,2000                | 0,190  | 0,536  | 0,690  | 0,719  | 0,773  | 1,008  | 1,548   | 2,063   | 2,946   | 0,525  | 0,412                           | 0,547  | 2,4000    |
| 0,2500                | 0,214  | 0,609  | 0,779  | 0,811  | 0,871  | 1,131  | 1,729   | 2,293   | 3,258   | 0,600  | 0,471                           | 0,617  | 3,0000    |
| 0,3200                | 0,244  | 0,701  | 0,892  | 0,930  | 1,000  | 1,296  | 1,975   | 2,607   | 3,686   | 0,700  | 0,550                           | 0,707  | 3,8400    |
| 0,4000                | 0,276  | 0,799  | 1,015  | 1,058  | 1,141  | 1,483  | 2,256   | 2,968   | 4,181   | 0,810  | 0,637                           | 0,803  | 4,8000    |
| 0,5000                | 0,315  | 0,917  | 1,165  | 1,216  | 1,316  | 1,719  | 2,614   | 3,427   | 4,811   | 0,947  | 0,745                           | 0,921  | 6,0000    |
| 0,6000                | 0,354  | 1,035  | 1,318  | 1,377  | 1,496  | 1,965  | 2,984   | 3,902   | 5,462   | 1,088  | 0,854                           | 1,041  | 7,2000    |
| 0,7000                | 0,395  | 1,154  | 1,478  | 1,546  | 1,685  | 2,223  | 3,372   | 4,400   | 6,139   | 1,234  | 0,968                           | 1,166  | 8,4000    |
| 0,8000                | 0,438  | 1,278  | 1,648  | 1,725  | 1,885  | 2,497  | 3,779   | 4,922   | 6,843   | 1,387  | 1,087                           | 1,298  | 9,6000    |
| 0,9000                | 0,484  | 1,409  | 1,830  | 1,915  | 2,098  | 2,787  | 4,206   | 5,466   | 7,576   | 1,548  | 1,213                           | 1,439  | 10,800    |
| 1,0000                | 0,534  | 1,546  | 2,021  | 2,116  | 2,324  | 3,093  | 4,653   | 6,029   | 8,334   | 1,718  | 1,345                           | 1,589  | 12,000    |
| 1,2500                | 0,669  | 1,915  | 2,539  | 2,660  | 2,936  | 3,913  | 5,832   | 7,499   | 10,297  | 2,176  | 1,704                           | 1,997  | 15,000    |
| 1,6000                | 0,892  | 2,496  | 3,349  | 3,508  | 3,887  | 5,170  | 7,603   | 9,684   | 13,153  | 2,898  | 2,277                           | 2,643  | 19,200    |
| 2,0000                | 1,196  | 3,254  | 4,386  | 4,594  | 5,093  | 6,737  | 9,767   | 12,333  | 16,548  | 3,835  | 3,032                           | 3,488  | 24,000    |
| 2,5000                | 1,655  | 4,348  | 5,839  | 6,121  | 6,764  | 8,868  | 12,661  | 15,831  | 20,971  | 5,168  | 4,124                           | 4,701  | 30,000    |
| 3,2000                | 2,448  | 6,162  | 8,169  | 8,565  | 9,404  | 12,166 | 17,048  | 21,102  | 27,570  | 7,327  | 5,922                           | 6,685  | 38,400    |
| 4,0000                | 3,563  | 8,650  | 11,258 | 11,794 | 12,858 | 16,410 | 22,605  | 27,739  | 35,811  | 10,210 | 8,354                           | 9,352  | 48,000    |
| 5,0000                | 5,256  | 12,386 | 15,774 | 16,493 | 17,850 | 22,472 | 30,454  | 37,047  | 47,231  | 14,429 | 11,946                          | 13,277 | 60,000    |
| 6,0000                | 7,265  | 16,804 | 21,011 | 21,936 | 23,611 | 29,398 | 39,339  | 47,534  | 59,984  | 19,327 | 16,136                          | 17,851 | 72,000    |
| 7,0000                | 9,574  | 21,888 | 26,959 | 28,113 | 30,138 | 37,189 | 49,278  | 59,203  | 74,127  | 24,896 | 20,914                          | 23,058 | 84,000    |
| 8,0000                | 12,177 | 27,631 | 33,604 | 35,003 | 37,429 | 45,845 | 60,283  | 72,068  | 89,655  | 31,125 | 26,270                          | 28,881 | 96,000    |
| 9,0000                | 15,072 | 34,016 | 40,944 | 42,607 | 45,474 | 55,369 | 72,377  | 86,157  | 106,576 | 38,015 | 32,205                          | 35,320 | 108,00    |
| 10,0000               | 18,257 | 41,008 | 48,966 | 50,915 | 54,255 | 65,754 | 85,537  | 101,468 | 124,896 | 45,562 | 38,716                          | 42,369 | 120,00    |
| 11,0000               | 21,728 | 48,594 | 57,651 | 59,910 | 63,763 | 76,997 | 99,745  | 117,991 | 144,635 | 53,755 | 45,793                          | 50,014 | 132,00    |
| 12,0000               | 25,487 | 56,772 | 66,993 | 69,585 | 73,989 | 89,090 | 114,986 | 135,707 | 165,787 | 62,589 | 53,435                          | 58,249 | 144,00    |

Таблица 42.13. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов азота  $^{14}_7\text{N}^+$  [1]

$E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Cu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                  | 2,972 | 2,458 | 1,801 | 1,198 | 0,973 | 0,882 | 0,818 | 0,756 | 0,481 | 0,412 | 0,378 | 0,324 | 0,1750    |
| 0,0160                  | 3,362 | 2,781 | 2,038 | 1,355 | 1,100 | 0,998 | 0,925 | 0,856 | 0,544 | 0,466 | 0,428 | 0,367 | 0,2240    |
| 0,0200                  | 3,759 | 3,110 | 2,278 | 1,515 | 1,250 | 1,110 | 1,034 | 0,957 | 0,608 | 0,521 | 0,478 | 0,410 | 0,2801    |
| 0,0250                  | 4,202 | 3,477 | 2,547 | 1,694 | 1,375 | 1,248 | 1,156 | 1,070 | 0,680 | 0,582 | 0,536 | 0,458 | 0,3501    |
| 0,0320                  | 4,749 | 3,936 | 2,881 | 1,916 | 1,559 | 1,418 | 1,308 | 1,210 | 0,769 | 0,660 | 0,608 | 0,522 | 0,4481    |
| 0,0400                  | 5,296 | 4,410 | 3,222 | 2,149 | 1,753 | 1,598 | 1,472 | 1,363 | 0,867 | 0,746 | 0,686 | 0,590 | 0,5601    |
| 0,0500                  | 5,843 | 4,898 | 3,567 | 2,350 | 1,958 | 1,784 | 1,644 | 1,523 | 0,967 | 0,840 | 0,774 | 0,665 | 0,7001    |
| 0,0600                  | 6,306 | 5,337 | 3,864 | 2,604 | 2,141 | 1,944 | 1,797 | 1,665 | 1,067 | 0,927 | 0,856 | 0,736 | 0,8402    |
| 0,0700                  | 6,700 | 5,731 | 4,123 | 2,795 | 2,309 | 2,094 | 1,938 | 1,798 | 1,154 | 1,010 | 0,936 | 0,804 | 0,9802    |
| 0,0800                  | 7,038 | 6,099 | 4,350 | 2,971 | 2,458 | 2,227 | 2,058 | 1,914 | 1,240 | 1,088 | 1,005 | 0,866 | 1,1202    |
| 0,0900                  | 7,331 | 6,435 | 4,551 | 3,131 | 2,594 | 2,357 | 2,171 | 2,020 | 1,324 | 1,158 | 1,074 | 0,926 | 1,2603    |
| 0,1000                  | 7,589 | 6,748 | 4,729 | 3,277 | 2,724 | 2,468 | 2,270 | 2,123 | 1,400 | 1,225 | 1,135 | 0,979 | 1,4003    |
| 0,1250                  | 8,096 | 7,470 | 5,092 | 3,585 | 2,994 | 2,714 | 2,495 | 2,337 | 1,566 | 1,370 | 1,281 | 1,107 | 1,7504    |
| 0,1600                  | 8,557 | 8,317 | 5,454 | 3,905 | 3,283 | 2,978 | 2,732 | 2,563 | 1,745 | 1,533 | 1,437 | 1,254 | 2,2405    |
| 0,2000                  | 8,862 | 8,994 | 5,725 | 4,162 | 3,521 | 3,189 | 2,925 | 2,742 | 1,901 | 1,677 | 1,574 | 1,374 | 2,8006    |
| 0,2500                  | 9,030 | 9,498 | 5,929 | 4,382 | 3,723 | 3,380 | 3,095 | 2,899 | 2,046 | 1,808 | 1,696 | 1,482 | 3,5008    |
| 0,3200                  | 9,058 | 9,841 | 6,071 | 4,571 | 3,904 | 3,564 | 3,248 | 3,035 | 2,173 | 1,931 | 1,812 | 1,594 | 4,4810    |
| 0,4000                  | 8,958 | 9,944 | 6,127 | 4,669 | 4,019 | 3,676 | 3,352 | 3,131 | 2,279 | 2,028 | 1,906 | 1,673 | 5,6012    |
| 0,5000                  | 8,759 | 9,843 | 6,125 | 4,735 | 4,104 | 3,767 | 3,430 | 3,197 | 2,364 | 2,107 | 1,981 | 1,746 | 7,0015    |
| 0,6000                  | 8,476 | 9,546 | 6,046 | 4,734 | 4,123 | 3,797 | 3,446 | 3,210 | 2,400 | 2,146 | 2,022 | 1,796 | 8,4018    |
| 0,7000                  | 8,209 | 9,215 | 5,953 | 4,703 | 4,114 | 3,792 | 3,435 | 3,203 | 2,417 | 2,161 | 2,042 | 1,810 | 9,8021    |
| 0,8000                  | 7,947 | 8,860 | 5,852 | 4,664 | 4,091 | 3,786 | 3,424 | 3,189 | 2,423 | 2,177 | 2,054 | 1,826 | 11,202    |
| 0,9000                  | 7,710 | 8,520 | 5,745 | 4,608 | 4,062 | 3,769 | 3,401 | 3,166 | 2,430 | 2,183 | 2,063 | 1,839 | 12,603    |
| 1,0000                  | 7,478 | 8,188 | 5,635 | 4,559 | 4,023 | 3,736 | 3,375 | 3,139 | 2,423 | 2,181 | 2,062 | 1,843 | 14,003    |
| 1,2500                  | 6,943 | 7,435 | 5,353 | 4,389 | 3,908 | 3,640 | 3,281 | 3,046 | 2,393 | 2,157 | 2,039 | 1,825 | 17,504    |
| 1,6000                  | 6,286 | 6,589 | 4,966 | 4,146 | 3,704 | 3,461 | 3,118 | 2,880 | 2,309 | 2,090 | 1,976 | 1,773 | 22,405    |
| 2,0000                  | 5,646 | 5,892 | 4,557 | 3,860 | 3,468 | 3,254 | 2,916 | 2,702 | 2,187 | 1,996 | 1,887 | 1,700 | 28,006    |
| 2,5000                  | 4,986 | 5,225 | 4,111 | 3,531 | 3,194 | 3,001 | 2,684 | 2,491 | 2,047 | 1,862 | 1,768 | 1,603 | 35,007    |
| 3,2000                  | 4,281 | 4,522 | 3,600 | 3,132 | 2,851 | 2,682 | 2,405 | 2,225 | 1,858 | 1,699 | 1,613 | 1,465 | 44,810    |
| 4,0000                  | 3,682 | 3,921 | 3,147 | 2,766 | 2,533 | 2,386 | 2,150 | 1,983 | 1,677 | 1,536 | 1,463 | 1,331 | 56,012    |
| 5,0000                  | 3,138 | 3,364 | 2,719 | 2,409 | 2,219 | 2,094 | 1,887 | 1,746 | 1,496 | 1,365 | 1,308 | 1,194 | 70,015    |
| 6,0000                  | 2,742 | 2,948 | 2,397 | 2,138 | 1,973 | 1,869 | 1,687 | 1,560 | 1,337 | 1,234 | 1,182 | 1,086 | 84,018    |
| 7,0000                  | 2,433 | 2,628 | 2,145 | 1,922 | 1,776 | 1,688 | 1,527 | 1,414 | 1,223 | 1,124 | 1,079 | 0,993 | 98,021    |
| 8,0000                  | 2,191 | 2,372 | 1,944 | 1,750 | 1,619 | 1,540 | 1,400 | 1,293 | 1,124 | 1,036 | 0,995 | 0,918 | 112,02    |
| 9,0000                  | 1,998 | 2,162 | 1,779 | 1,606 | 1,489 | 1,418 | 1,290 | 1,194 | 1,041 | 0,961 | 0,923 | 0,854 | 126,03    |
| 10,0000                 | 1,835 | 1,986 | 1,641 | 1,489 | 1,379 | 1,315 | 1,197 | 1,111 | 0,968 | 0,898 | 0,865 | 0,799 | 140,03    |
| 11,0000                 | 1,699 | 1,841 | 1,525 | 1,388 | 1,278 | 1,228 | 1,118 | 1,042 | 0,909 | 0,845 | 0,816 | 0,752 | 154,03    |
| 12,0000                 | 1,583 | 1,714 | 1,425 | 1,299 | 1,207 | 1,153 | 1,050 | 0,980 | 0,856 | 0,798 | 0,769 | 0,710 | 168,04    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | H      | He     | N      | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | (Cl <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода   | $E$ , МэВ |
|-------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|--------|-----------|
| 0,0125                  | 6,754  | 2,881  | 1,909  | 1,794 | 1,594 | 1,052 | 0,645 | 0,457 | 0,302 | 2,415  | 3,072                           | 2,347  | 0,1750    |
| 0,0160                  | 7,498  | 3,162  | 2,125  | 1,999 | 1,777 | 1,200 | 0,744 | 0,530 | 0,352 | 2,716  | 3,456                           | 2,610  | 0,2240    |
| 0,0200                  | 8,155  | 3,349  | 2,317  | 2,182 | 1,952 | 1,355 | 0,845 | 0,615 | 0,411 | 3,012  | 3,829                           | 2,845  | 0,2801    |
| 0,0250                  | 8,863  | 3,517  | 2,527  | 2,381 | 2,155 | 1,546 | 0,988 | 0,721 | 0,522 | 3,336  | 4,246                           | 3,102  | 0,3501    |
| 0,0320                  | 9,826  | 3,729  | 2,763  | 2,631 | 2,403 | 1,801 | 1,170 | 0,882 | 0,614 | 3,746  | 4,778                           | 3,429  | 0,4481    |
| 0,0400                  | 10,792 | 3,924  | 3,006  | 2,893 | 2,664 | 2,081 | 1,379 | 1,057 | 0,751 | 4,172  | 5,322                           | 3,769  | 0,5601    |
| 0,0500                  | 11,807 | 4,152  | 3,278  | 3,189 | 2,968 | 2,394 | 1,612 | 1,256 | 0,910 | 4,616  | 5,886                           | 4,145  | 0,7001    |
| 0,0600                  | 12,907 | 4,417  | 3,582  | 3,462 | 3,273 | 2,693 | 1,832 | 1,441 | 1,059 | 5,027  | 6,418                           | 4,513  | 0,8402    |
| 0,0700                  | 13,977 | 4,733  | 3,876  | 3,764 | 3,570 | 2,977 | 2,028 | 1,612 | 1,192 | 5,417  | 6,910                           | 4,898  | 0,9802    |
| 0,0800                  | 15,095 | 5,068  | 4,180  | 4,063 | 3,867 | 3,249 | 2,227 | 1,775 | 1,318 | 5,794  | 7,382                           | 5,290  | 1,1202    |
| 0,0900                  | 16,155 | 5,420  | 4,482  | 4,369 | 4,159 | 3,509 | 2,412 | 1,929 | 1,429 | 6,152  | 7,823                           | 5,679  | 1,2603    |
| 0,1000                  | 17,306 | 5,807  | 4,814  | 4,662 | 4,435 | 3,759 | 2,596 | 2,066 | 1,532 | 6,492  | 8,256                           | 6,067  | 1,4003    |
| 0,1250                  | 20,214 | 6,747  | 5,576  | 5,372 | 5,133 | 4,333 | 2,984 | 2,378 | 1,767 | 7,302  | 9,293                           | 7,022  | 1,7504    |
| 0,1600                  | 24,160 | 8,055  | 6,610  | 6,370 | 6,043 | 5,034 | 3,452 | 2,749 | 2,040 | 8,328  | 10,580                          | 8,344  | 2,2405    |
| 0,2000                  | 28,110 | 9,332  | 7,643  | 7,339 | 6,939 | 5,639 | 3,836 | 3,046 | 2,250 | 9,240  | 11,725                          | 9,647  | 2,8006    |
| 0,2500                  | 32,135 | 10,637 | 8,627  | 8,307 | 7,755 | 6,131 | 4,144 | 3,249 | 2,389 | 10,044 | 12,730                          | 10,957 | 3,5008    |
| 0,3200                  | 36,060 | 11,771 | 9,574  | 9,137 | 8,359 | 6,405 | 4,274 | 3,333 | 2,434 | 10,697 | 13,586                          | 12,129 | 4,4810    |
| 0,4000                  | 38,233 | 12,622 | 10,024 | 9,528 | 8,627 | 6,440 | 4,258 | 3,315 | 2,414 | 10,986 | 13,988                          | 12,720 | 5,6012    |
| 0,5000                  | 39,078 | 12,985 | 10,088 | 9,598 | 8,587 | 6,315 | 4,165 | 3,252 | 2,370 | 10,982 | 14,020                          | 12,875 | 7,0015    |

| $E_m$ ,<br>МэВ, а.е.м. | H      | He     | N     | O     | Ne    | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|--------|-----------|
| 0,6000                 | 38,389 | 12,877 | 9,745 | 9,262 | 8,276 | 6,052 | 4,014 | 3,132 | 2,291 | 10,652 | 13,669     | 12,496 | 8,4018    |
| 0,7000                 | 36,552 | 12,561 | 9,239 | 8,781 | 7,858 | 5,739 | 3,840 | 2,988 | 2,209 | 10,210 | 13,121     | 11,865 | 9,8021    |
| 0,8000                 | 34,352 | 12,055 | 8,714 | 8,310 | 7,426 | 5,431 | 3,675 | 2,868 | 2,130 | 9,738  | 12,500     | 11,201 | 11,202    |
| 0,9000                 | 32,174 | 11,468 | 8,216 | 7,831 | 6,963 | 5,136 | 3,505 | 2,769 | 2,057 | 9,279  | 11,899     | 10,537 | 12,603    |
| 1,0000                 | 30,373 | 10,983 | 7,838 | 7,438 | 6,627 | 4,908 | 3,381 | 2,694 | 2,000 | 8,864  | 11,355     | 9,985  | 14,003    |
| 1,2500                 | 26,604 | 9,562  | 7,093 | 6,771 | 6,017 | 4,512 | 3,169 | 2,559 | 1,932 | 8,013  | 10,176     | 8,977  | 17,504    |
| 1,6000                 | 22,444 | 8,789  | 6,346 | 6,068 | 5,432 | 4,146 | 2,974 | 2,418 | 1,872 | 7,076  | 8,854      | 7,885  | 22,405    |
| 2,0000                 | 18,866 | 7,733  | 5,733 | 5,459 | 4,940 | 3,837 | 2,803 | 2,301 | 1,809 | 6,289  | 7,747      | 6,949  | 28,006    |
| 2,5000                 | 15,539 | 6,680  | 5,102 | 4,855 | 4,481 | 3,544 | 2,631 | 2,191 | 1,743 | 5,533  | 6,697      | 6,043  | 35,007    |
| 3,2000                 | 12,601 | 5,599  | 4,439 | 4,238 | 3,935 | 3,186 | 2,423 | 2,016 | 1,617 | 4,763  | 5,678      | 5,166  | 44,810    |
| 4,0000                 | 10,386 | 4,696  | 3,840 | 3,682 | 3,462 | 2,832 | 2,172 | 1,828 | 1,479 | 4,110  | 4,843      | 4,428  | 56,012    |
| 5,0000                 | 8,648  | 3,930  | 3,288 | 3,165 | 2,983 | 2,472 | 1,923 | 1,624 | 1,333 | 3,519  | 4,120      | 3,775  | 70,015    |
| 6,0000                 | 7,454  | 3,389  | 2,881 | 2,771 | 2,624 | 2,191 | 1,711 | 1,455 | 1,198 | 3,077  | 3,593      | 3,291  | 84,018    |
| 7,0000                 | 6,586  | 2,991  | 2,570 | 2,478 | 2,343 | 1,969 | 1,549 | 1,321 | 1,092 | 2,744  | 3,194      | 2,935  | 98,021    |
| 8,0000                 | 5,909  | 2,673  | 2,323 | 2,241 | 2,117 | 1,786 | 1,405 | 1,205 | 1,001 | 2,477  | 2,887      | 2,650  | 112,02    |
| 9,0000                 | 5,355  | 2,424  | 2,119 | 2,046 | 1,936 | 1,637 | 1,290 | 1,108 | 0,925 | 2,256  | 2,617      | 2,414  | 126,03    |
| 10,0000                | 4,908  | 2,241  | 1,955 | 1,888 | 1,786 | 1,510 | 1,193 | 1,026 | 0,859 | 2,075  | 2,403      | 2,223  | 140,03    |
| 11,0000                | 4,529  | 2,077  | 1,816 | 1,754 | 1,659 | 1,403 | 1,112 | 0,956 | 0,801 | 1,923  | 2,225      | 2,062  | 154,03    |
| 12,0000                | 4,203  | 1,936  | 1,697 | 1,639 | 1,550 | 1,311 | 1,042 | 0,896 | 0,751 | 1,792  | 2,070      | 1,924  | 168,04    |

Таблица 42.14. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов азота  $^{14}N^+$  в различных веществах [1]  
 $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al     | Ti     | Ni     | Ge     | Zr      | Ag      | Cu      | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,0125                | 0,073  | 0,083  | 0,116  | 0,176  | 0,209  | 0,247  | 0,272   | 0,303   | 0,474   | 0,561   | 0,614   | 0,734   | 0,1750    |
| 0,0160                | 0,088  | 0,100  | 0,139  | 0,210  | 0,250  | 0,293  | 0,322   | 0,358   | 0,559   | 0,661   | 0,721   | 0,861   | 0,2240    |
| 0,0200                | 0,103  | 0,118  | 0,163  | 0,246  | 0,293  | 0,341  | 0,375   | 0,414   | 0,647   | 0,763   | 0,833   | 0,992   | 0,2801    |
| 0,0250                | 0,120  | 0,138  | 0,191  | 0,287  | 0,342  | 0,396  | 0,434   | 0,479   | 0,747   | 0,880   | 0,960   | 1,141   | 0,3501    |
| 0,0320                | 0,141  | 0,163  | 0,225  | 0,338  | 0,405  | 0,466  | 0,509   | 0,560   | 0,874   | 1,028   | 1,120   | 1,328   | 0,4481    |
| 0,0400                | 0,163  | 0,189  | 0,261  | 0,391  | 0,469  | 0,537  | 0,586   | 0,644   | 1,004   | 1,180   | 1,285   | 1,520   | 0,5601    |
| 0,0500                | 0,188  | 0,219  | 0,301  | 0,451  | 0,542  | 0,617  | 0,673   | 0,737   | 1,151   | 1,349   | 1,469   | 1,734   | 0,7001    |
| 0,0600                | 0,211  | 0,245  | 0,338  | 0,505  | 0,608  | 0,691  | 0,752   | 0,823   | 1,284   | 1,503   | 1,635   | 1,928   | 0,8402    |
| 0,0700                | 0,232  | 0,270  | 0,372  | 0,556  | 0,669  | 0,758  | 0,826   | 0,902   | 1,407   | 1,643   | 1,787   | 2,105   | 0,9802    |
| 0,0800                | 0,252  | 0,294  | 0,405  | 0,604  | 0,727  | 0,822  | 0,894   | 0,976   | 1,521   | 1,774   | 1,928   | 2,269   | 1,1202    |
| 0,0900                | 0,272  | 0,316  | 0,436  | 0,649  | 0,781  | 0,882  | 0,960   | 1,046   | 1,628   | 1,896   | 2,060   | 2,422   | 1,2603    |
| 0,1000                | 0,291  | 0,337  | 0,466  | 0,693  | 0,833  | 0,940  | 1,023   | 1,114   | 1,730   | 2,012   | 2,185   | 2,567   | 1,4003    |
| 0,1250                | 0,335  | 0,387  | 0,538  | 0,795  | 0,956  | 1,075  | 1,169   | 1,271   | 1,966   | 2,282   | 2,475   | 2,903   | 1,7504    |
| 0,1600                | 0,394  | 0,449  | 0,630  | 0,926  | 1,112  | 1,247  | 1,357   | 1,470   | 2,261   | 2,619   | 2,835   | 3,317   | 2,2405    |
| 0,2000                | 0,458  | 0,513  | 0,730  | 1,064  | 1,276  | 1,429  | 1,554   | 1,681   | 2,568   | 2,968   | 3,207   | 3,743   | 2,8006    |
| 0,2500                | 0,536  | 0,589  | 0,850  | 1,228  | 1,469  | 1,642  | 1,787   | 1,929   | 2,923   | 3,369   | 3,635   | 4,233   | 3,5008    |
| 0,3200                | 0,644  | 0,690  | 1,013  | 1,447  | 1,726  | 1,924  | 2,095   | 2,259   | 3,387   | 3,893   | 4,193   | 4,870   | 4,4810    |
| 0,4000                | 0,769  | 0,803  | 1,197  | 1,689  | 2,008  | 2,233  | 2,435   | 2,622   | 3,890   | 4,458   | 4,795   | 5,555   | 5,6012    |
| 0,5000                | 0,927  | 0,945  | 1,425  | 1,987  | 2,353  | 2,609  | 2,847   | 3,064   | 4,493   | 5,135   | 5,515   | 6,374   | 7,0015    |
| 0,6000                | 1,089  | 1,089  | 1,655  | 2,282  | 2,693  | 2,979  | 3,254   | 3,501   | 5,080   | 5,794   | 6,215   | 7,165   | 8,4018    |
| 0,7000                | 1,257  | 1,238  | 1,889  | 2,579  | 3,033  | 3,348  | 3,661   | 3,938   | 5,662   | 6,444   | 6,904   | 7,941   | 9,8021    |
| 0,8000                | 1,430  | 1,393  | 2,126  | 2,878  | 3,374  | 3,717  | 4,070   | 4,376   | 6,240   | 7,089   | 7,587   | 8,712   | 11,202    |
| 0,9000                | 1,609  | 1,555  | 2,368  | 3,180  | 3,718  | 4,088  | 4,480   | 4,817   | 6,817   | 7,731   | 8,267   | 9,476   | 12,603    |
| 1,0000                | 1,793  | 1,722  | 2,614  | 3,485  | 4,064  | 4,461  | 4,893   | 5,261   | 7,394   | 8,373   | 8,946   | 10,236  | 14,003    |
| 1,2500                | 2,279  | 2,171  | 3,251  | 4,268  | 4,947  | 5,410  | 5,945   | 6,393   | 8,847   | 9,986   | 10,653  | 12,145  | 17,504    |
| 1,6000                | 3,021  | 2,871  | 4,202  | 5,417  | 6,235  | 6,791  | 7,477   | 8,047   | 10,932  | 12,294  | 13,093  | 14,868  | 22,405    |
| 2,0000                | 3,962  | 3,771  | 5,380  | 6,817  | 7,798  | 8,461  | 9,335   | 10,056  | 13,425  | 15,036  | 15,994  | 18,095  | 28,006    |
| 2,5000                | 5,283  | 5,034  | 6,999  | 8,715  | 9,904  | 10,703 | 11,839  | 12,756  | 16,736  | 18,670  | 19,830  | 22,339  | 35,007    |
| 3,2000                | 7,409  | 7,055  | 9,552  | 11,668 | 13,157 | 14,164 | 15,703  | 16,927  | 21,769  | 24,188  | 25,644  | 28,743  | 44,810    |
| 4,0000                | 10,237 | 9,721  | 12,887 | 15,481 | 17,333 | 18,601 | 20,604  | 22,271  | 28,126  | 31,134  | 32,948  | 36,000  | 56,012    |
| 5,0000                | 14,369 | 13,587 | 17,687 | 20,920 | 23,254 | 24,882 | 27,610  | 29,816  | 36,987  | 40,828  | 43,092  | 47,909  | 70,015    |
| 6,0000                | 19,153 | 18,044 | 23,183 | 27,102 | 29,961 | 31,974 | 35,472  | 38,317  | 46,907  | 51,635  | 54,376  | 60,230  | 84,018    |
| 7,0000                | 24,584 | 23,083 | 29,369 | 34,021 | 37,454 | 39,868 | 44,208  | 47,759  | 57,873  | 63,540  | 66,795  | 73,734  | 98,021    |
| 8,0000                | 30,658 | 28,700 | 36,235 | 41,667 | 45,721 | 48,564 | 53,797  | 58,131  | 69,834  | 76,530  | 80,323  | 88,419  | 112,02    |
| 9,0000                | 37,359 | 34,891 | 43,773 | 50,028 | 54,748 | 58,052 | 64,229  | 69,414  | 82,796  | 90,580  | 94,944  | 104,253 | 126,03    |
| 10,0000               | 44,678 | 41,656 | 51,974 | 59,090 | 64,529 | 68,316 | 75,510  | 81,582  | 96,755  | 105,669 | 110,624 | 121,215 | 140,04    |
| 11,0000               | 52,615 | 48,985 | 60,832 | 68,839 | 75,048 | 79,346 | 87,626  | 94,607  | 111,691 | 121,757 | 127,303 | 139,290 | 154,03    |
| 12,0000               | 61,160 | 56,874 | 70,337 | 79,273 | 86,290 | 91,125 | 100,559 | 108,473 | 127,573 | 138,822 | 144,987 | 158,473 | 168,04    |

| $E_m^*$<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar     | Kr     | Xe      | Rn      | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода   | E, МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|------------|--------|--------|
| 0,0125                | 0,027  | 0,069  | 0,100  | 0,106  | 0,119  | 0,186  | 0,318  | 0,469   | 0,733   | 0,080  | 0,063      | 0,077  | 0,1750 |
| 0,0160                | 0,033  | 0,084  | 0,122  | 0,129  | 0,144  | 0,224  | 0,379  | 0,555   | 0,863   | 0,097  | 0,076      | 0,095  | 0,2240 |
| 0,0200                | 0,039  | 0,100  | 0,145  | 0,154  | 0,171  | 0,263  | 0,442  | 0,643   | 0,994   | 0,116  | 0,090      | 0,114  | 0,2801 |
| 0,0250                | 0,047  | 0,119  | 0,172  | 0,182  | 0,203  | 0,308  | 0,512  | 0,739   | 1,133   | 0,136  | 0,107      | 0,136  | 0,3501 |
| 0,0320                | 0,057  | 0,145  | 0,207  | 0,219  | 0,244  | 0,363  | 0,597  | 0,854   | 1,295   | 0,163  | 0,128      | 0,164  | 0,4481 |
| 0,0400                | 0,067  | 0,173  | 0,244  | 0,258  | 0,286  | 0,419  | 0,681  | 0,965   | 1,452   | 0,190  | 0,149      | 0,194  | 0,5601 |
| 0,0500                | 0,079  | 0,207  | 0,288  | 0,303  | 0,334  | 0,479  | 0,772  | 1,082   | 1,615   | 0,221  | 0,173      | 0,228  | 0,7001 |
| 0,0600                | 0,090  | 0,239  | 0,327  | 0,344  | 0,378  | 0,533  | 0,851  | 1,184   | 1,754   | 0,250  | 0,196      | 0,260  | 0,8402 |
| 0,0700                | 0,100  | 0,269  | 0,364  | 0,382  | 0,418  | 0,582  | 0,922  | 1,274   | 1,876   | 0,276  | 0,216      | 0,289  | 0,9802 |
| 0,0800                | 0,110  | 0,297  | 0,398  | 0,417  | 0,455  | 0,626  | 0,987  | 1,355   | 1,986   | 0,301  | 0,236      | 0,316  | 1,1202 |
| 0,0900                | 0,119  | 0,324  | 0,430  | 0,450  | 0,489  | 0,667  | 1,048  | 1,431   | 2,088   | 0,324  | 0,254      | 0,341  | 1,2603 |
| 0,1000                | 0,127  | 0,349  | 0,460  | 0,481  | 0,522  | 0,706  | 1,104  | 1,501   | 2,183   | 0,346  | 0,272      | 0,365  | 1,4003 |
| 0,1250                | 0,146  | 0,405  | 0,528  | 0,550  | 0,595  | 0,792  | 1,229  | 1,658   | 2,395   | 0,397  | 0,312      | 0,419  | 1,7504 |
| 0,1600                | 0,168  | 0,471  | 0,608  | 0,634  | 0,683  | 0,897  | 1,381  | 1,850   | 2,653   | 0,460  | 0,361      | 0,483  | 2,2405 |
| 0,2000                | 0,189  | 0,535  | 0,687  | 0,716  | 0,769  | 1,002  | 1,535  | 2,043   | 2,914   | 0,523  | 0,411      | 0,545  | 2,8006 |
| 0,2500                | 0,212  | 0,606  | 0,773  | 0,805  | 0,864  | 1,121  | 1,710  | 2,265   | 3,215   | 0,596  | 0,468      | 0,613  | 3,5008 |
| 0,3200                | 0,241  | 0,693  | 0,881  | 0,918  | 0,986  | 1,277  | 1,943  | 2,562   | 3,621   | 0,690  | 0,543      | 0,698  | 4,4810 |
| 0,4000                | 0,271  | 0,785  | 0,995  | 1,038  | 1,118  | 1,451  | 2,205  | 2,899   | 4,082   | 0,794  | 0,624      | 0,788  | 5,6012 |
| 0,5000                | 0,308  | 0,894  | 1,134  | 1,184  | 1,280  | 1,671  | 2,537  | 3,325   | 4,667   | 0,921  | 0,724      | 0,897  | 7,0015 |
| 0,6000                | 0,344  | 1,002  | 1,275  | 1,332  | 1,446  | 1,897  | 2,880  | 3,764   | 5,268   | 1,050  | 0,825      | 1,007  | 8,4018 |
| 0,7000                | 0,381  | 1,112  | 1,423  | 1,488  | 1,620  | 2,135  | 3,236  | 4,222   | 5,890   | 1,185  | 0,929      | 1,122  | 9,8021 |
| 0,8000                | 0,421  | 1,226  | 1,579  | 1,652  | 1,803  | 2,386  | 3,609  | 4,700   | 6,536   | 1,325  | 1,039      | 1,244  | 11,202 |
| 0,9000                | 0,463  | 1,345  | 1,744  | 1,825  | 1,998  | 2,651  | 3,999  | 5,197   | 7,205   | 1,472  | 1,154      | 1,373  | 12,603 |
| 1,0000                | 0,507  | 1,470  | 1,919  | 2,009  | 2,204  | 2,930  | 4,406  | 5,710   | 7,895   | 1,627  | 1,274      | 1,509  | 14,003 |
| 1,2500                | 0,631  | 1,805  | 2,388  | 2,502  | 2,758  | 3,674  | 5,476  | 7,043   | 9,675   | 2,042  | 1,600      | 1,879  | 17,504 |
| 1,6000                | 0,831  | 2,329  | 3,119  | 3,267  | 3,616  | 4,807  | 7,072  | 9,013   | 12,251  | 2,693  | 2,116      | 2,462  | 22,405 |
| 2,0000                | 1,104  | 3,009  | 4,048  | 4,240  | 4,698  | 6,212  | 9,012  | 11,388  | 15,295  | 3,533  | 2,793      | 3,219  | 28,006 |
| 2,5000                | 1,513  | 3,984  | 5,344  | 5,602  | 6,187  | 8,112  | 11,592 | 14,507  | 19,239  | 4,722  | 3,766      | 4,301  | 35,007 |
| 3,2000                | 2,215  | 5,590  | 7,408  | 7,767  | 8,526  | 11,034 | 15,479 | 19,176  | 25,085  | 6,635  | 5,360      | 6,059  | 44,810 |
| 4,0000                | 3,197  | 7,781  | 10,128 | 10,610 | 11,568 | 14,770 | 20,372 | 25,021  | 32,341  | 9,173  | 7,501      | 8,406  | 56,012 |
| 5,0000                | 4,680  | 11,051 | 14,080 | 14,723 | 15,937 | 20,076 | 27,242 | 33,168  | 42,337  | 12,865 | 10,645     | 11,842 | 70,015 |
| 6,0000                | 6,428  | 14,897 | 18,640 | 19,461 | 20,952 | 26,106 | 34,977 | 42,297  | 53,439  | 17,130 | 14,293     | 15,824 | 84,018 |
| 7,0000                | 8,430  | 19,303 | 23,795 | 24,815 | 26,609 | 32,858 | 43,592 | 52,411  | 65,698  | 21,957 | 18,433     | 20,337 | 98,021 |
| 8,0000                | 10,678 | 24,263 | 29,534 | 30,765 | 32,905 | 40,334 | 53,095 | 63,521  | 79,107  | 27,336 | 23,059     | 25,366 | 112,02 |
| 9,0000                | 13,170 | 29,760 | 35,852 | 37,311 | 39,831 | 48,531 | 63,506 | 75,649  | 93,672  | 33,267 | 28,168     | 30,908 | 126,03 |
| 10,0000               | 15,904 | 35,762 | 42,739 | 44,443 | 47,369 | 57,446 | 74,803 | 88,792  | 109,399 | 39,745 | 33,757     | 36,959 | 140,03 |
| 11,0000               | 18,876 | 42,258 | 50,175 | 52,145 | 55,510 | 67,074 | 86,969 | 102,941 | 126,301 | 46,761 | 39,817     | 43,505 | 154,03 |
| 12,0000               | 22,087 | 49,245 | 58,157 | 60,410 | 64,246 | 77,406 | 99,990 | 118,077 | 144,373 | 54,308 | 46,346     | 50,542 | 168,04 |

Таблица 42.15. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов кислорода  $^{16}_8O^+$  [1] $E_n$  — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

| $E_m^*$<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | E, МэВ |
|-----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0,0125                | 3,228  | 2,671  | 1,956 | 1,301 | 1,056 | 0,959 | 0,888 | 0,822 | 0,522 | 0,447 | 0,411 | 0,352 | 0,1999 |
| 0,0160                | 3,652  | 3,021  | 2,213 | 1,472 | 1,195 | 1,085 | 1,005 | 0,930 | 0,591 | 0,506 | 0,465 | 0,398 | 0,2559 |
| 0,0200                | 4,083  | 3,378  | 2,475 | 1,646 | 1,336 | 1,213 | 1,124 | 1,039 | 0,661 | 0,565 | 0,520 | 0,445 | 0,3199 |
| 0,0250                | 4,565  | 3,777  | 2,767 | 1,840 | 1,494 | 1,356 | 1,256 | 1,162 | 0,739 | 0,632 | 0,582 | 0,498 | 0,3999 |
| 0,0320                | 5,159  | 4,276  | 3,130 | 2,082 | 1,694 | 1,540 | 1,421 | 1,315 | 0,836 | 0,717 | 0,660 | 0,567 | 0,5118 |
| 0,0400                | 5,754  | 4,791  | 3,500 | 2,334 | 1,904 | 1,736 | 1,599 | 1,480 | 0,941 | 0,810 | 0,745 | 0,640 | 0,6398 |
| 0,0500                | 6,363  | 5,334  | 3,885 | 2,603 | 2,133 | 1,942 | 1,791 | 1,659 | 1,053 | 0,915 | 0,843 | 0,725 | 0,7997 |
| 0,0600                | 6,890  | 5,830  | 4,222 | 2,846 | 2,339 | 2,124 | 1,963 | 1,820 | 1,165 | 1,013 | 0,935 | 0,804 | 0,9597 |
| 0,0700                | 7,347  | 6,284  | 4,521 | 3,065 | 2,532 | 2,297 | 2,125 | 1,971 | 1,266 | 1,108 | 1,026 | 0,882 | 1,1196 |
| 0,0800                | 7,748  | 6,714  | 4,789 | 3,271 | 2,706 | 2,452 | 2,265 | 2,107 | 1,365 | 1,197 | 1,106 | 0,953 | 1,2796 |
| 0,0900                | 8,103  | 7,113  | 5,030 | 3,461 | 2,867 | 2,606 | 2,399 | 2,233 | 1,464 | 1,280 | 1,187 | 1,024 | 1,4395 |
| 0,1000                | 8,423  | 7,489  | 5,248 | 3,637 | 3,023 | 2,739 | 2,519 | 2,356 | 1,553 | 1,359 | 1,260 | 1,086 | 1,5995 |
| 0,1250                | 9,075  | 8,373  | 5,707 | 4,018 | 3,356 | 3,042 | 2,797 | 2,620 | 1,755 | 1,535 | 1,435 | 1,241 | 1,9994 |
| 0,1600                | 9,710  | 9,438  | 6,189 | 4,431 | 3,726 | 3,379 | 3,101 | 2,909 | 1,980 | 1,739 | 1,631 | 1,423 | 2,5592 |
| 0,2000                | 10,171 | 10,323 | 6,571 | 4,777 | 4,041 | 3,660 | 3,358 | 3,147 | 2,181 | 1,925 | 1,807 | 1,577 | 3,1990 |
| 0,2500                | 10,478 | 11,022 | 6,880 | 5,084 | 4,321 | 3,922 | 3,591 | 3,364 | 2,374 | 2,098 | 1,968 | 1,720 | 3,9988 |
| 0,3200                | 10,635 | 11,555 | 7,128 | 5,367 | 4,583 | 4,184 | 3,814 | 3,564 | 2,552 | 2,267 | 2,128 | 1,871 | 5,1184 |
| 0,4000                | 10,635 | 11,806 | 7,274 | 5,543 | 4,772 | 4,364 | 3,979 | 3,717 | 2,706 | 2,408 | 2,262 | 1,986 | 6,3980 |



| $E_m^*$<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | E, МэВ |
|-----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0,5000                | 10,525 | 11,828 | 7,360 | 5,689 | 4,931 | 4,526 | 4,122 | 3,842 | 2,841 | 2,532 | 2,381 | 2,098 | 7,9975 |
| 0,6000                | 10,274 | 11,571 | 7,328 | 5,738 | 4,998 | 4,602 | 4,177 | 3,891 | 2,909 | 2,601 | 2,451 | 2,176 | 9,5970 |
| 0,7000                | 10,004 | 11,230 | 7,255 | 5,731 | 5,013 | 4,621 | 4,186 | 3,903 | 2,945 | 2,633 | 2,488 | 2,205 | 11,196 |
| 0,8000                | 9,716  | 10,832 | 7,155 | 5,702 | 5,001 | 4,629 | 4,185 | 3,899 | 2,962 | 2,662 | 2,511 | 2,232 | 12,796 |
| 0,9000                | 9,445  | 10,438 | 7,038 | 5,645 | 4,976 | 4,617 | 4,167 | 3,878 | 2,977 | 2,675 | 2,527 | 2,252 | 14,395 |
| 0,1000                | 9,172  | 10,043 | 6,912 | 5,592 | 4,935 | 4,583 | 4,140 | 3,850 | 2,972 | 2,675 | 2,530 | 2,260 | 15,995 |
| 1,2500                | 8,532  | 9,137  | 6,578 | 5,394 | 4,802 | 4,473 | 4,033 | 3,743 | 2,941 | 2,651 | 2,506 | 2,243 | 19,994 |
| 1,6000                | 7,743  | 8,116  | 6,116 | 5,107 | 4,562 | 4,263 | 3,841 | 3,547 | 2,844 | 2,575 | 2,434 | 2,183 | 25,592 |
| 2,0000                | 6,978  | 7,282  | 5,632 | 4,770 | 4,286 | 4,021 | 3,604 | 3,340 | 2,703 | 2,467 | 2,332 | 2,101 | 31,990 |
| 2,5000                | 6,196  | 6,492  | 5,108 | 4,338 | 3,969 | 3,729 | 3,335 | 3,095 | 2,544 | 2,314 | 2,196 | 1,992 | 39,987 |
| 3,2000                | 5,360  | 5,662  | 4,508 | 3,922 | 3,570 | 3,358 | 3,011 | 2,786 | 2,326 | 2,128 | 2,020 | 1,835 | 51,184 |
| 4,0000                | 4,646  | 4,947  | 3,971 | 3,490 | 3,196 | 3,010 | 2,712 | 2,501 | 2,116 | 1,938 | 1,846 | 1,680 | 63,980 |
| 5,0000                | 3,988  | 4,275  | 3,456 | 3,062 | 2,820 | 2,661 | 2,398 | 2,219 | 1,901 | 1,735 | 1,662 | 1,517 | 79,975 |
| 6,0000                | 3,502  | 3,765  | 3,061 | 2,731 | 2,519 | 2,388 | 2,155 | 1,993 | 1,708 | 1,577 | 1,509 | 1,387 | 95,970 |
| 7,0000                | 3,118  | 3,368  | 2,749 | 2,463 | 2,276 | 2,164 | 1,957 | 1,812 | 1,567 | 1,441 | 1,383 | 1,273 | 111,96 |
| 8,0000                | 2,814  | 3,046  | 2,497 | 2,247 | 2,080 | 1,977 | 1,798 | 1,660 | 1,443 | 1,331 | 1,278 | 1,178 | 127,96 |
| 9,0000                | 2,569  | 2,779  | 2,288 | 2,066 | 1,915 | 1,823 | 1,659 | 1,535 | 1,338 | 1,235 | 1,187 | 1,098 | 143,95 |
| 10,0000               | 2,361  | 2,556  | 2,112 | 1,916 | 1,774 | 1,692 | 1,540 | 1,430 | 1,246 | 1,155 | 1,113 | 1,029 | 159,95 |
| 11,0000               | 2,186  | 2,368  | 1,962 | 1,786 | 1,656 | 1,580 | 1,438 | 1,340 | 1,169 | 1,087 | 1,050 | 0,967 | 175,94 |
| 12,0000               | 2,036  | 2,205  | 1,833 | 1,672 | 1,552 | 1,483 | 1,351 | 1,261 | 1,102 | 1,026 | 0,990 | 0,913 | 191,94 |

| $E_m^*$<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода   | E, МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|--------|--------|
| 0,0125                | 7,337  | 3,130  | 2,074  | 1,949  | 1,731  | 1,143 | 0,700 | 0,497 | 0,328 | 2,624  | 3,338                           | 2,547  | 0,1999 |
| 0,0160                | 8,146  | 3,435  | 2,309  | 2,171  | 1,930  | 1,304 | 0,808 | 0,576 | 0,382 | 2,951  | 3,754                           | 2,835  | 0,2559 |
| 0,0200                | 8,860  | 3,638  | 2,517  | 2,371  | 2,121  | 1,472 | 0,918 | 0,668 | 0,447 | 3,272  | 4,160                           | 3,091  | 0,3199 |
| 0,0250                | 9,629  | 3,821  | 2,745  | 2,587  | 2,341  | 1,679 | 1,074 | 0,783 | 0,567 | 3,625  | 4,612                           | 3,370  | 0,3999 |
| 0,0320                | 10,674 | 4,051  | 3,002  | 2,858  | 2,611  | 1,956 | 1,271 | 0,958 | 0,667 | 4,069  | 5,190                           | 3,725  | 0,5118 |
| 0,0400                | 11,724 | 4,263  | 3,265  | 3,143  | 2,894  | 2,261 | 1,498 | 1,148 | 0,815 | 4,532  | 5,782                           | 4,095  | 0,6398 |
| 0,0500                | 12,859 | 4,522  | 3,570  | 3,473  | 3,232  | 2,607 | 1,756 | 1,367 | 0,991 | 5,027  | 6,410                           | 4,514  | 0,7997 |
| 0,0600                | 14,101 | 4,826  | 3,914  | 3,783  | 3,576  | 2,943 | 2,001 | 1,575 | 1,157 | 5,493  | 7,012                           | 4,931  | 0,9597 |
| 0,0700                | 15,326 | 5,190  | 4,250  | 4,128  | 3,915  | 3,264 | 2,224 | 1,768 | 1,307 | 5,941  | 7,577                           | 5,371  | 1,1196 |
| 0,0800                | 16,617 | 5,579  | 4,602  | 4,473  | 4,257  | 3,577 | 2,452 | 1,954 | 1,451 | 6,379  | 8,127                           | 5,823  | 1,2796 |
| 0,0900                | 17,857 | 5,991  | 4,955  | 4,829  | 4,597  | 3,878 | 2,666 | 2,133 | 1,579 | 6,801  | 8,647                           | 6,278  | 1,4395 |
| 0,1000                | 19,208 | 6,445  | 5,342  | 5,175  | 4,923  | 4,172 | 2,881 | 2,293 | 1,700 | 7,205  | 9,163                           | 6,733  | 1,5995 |
| 0,1250                | 22,658 | 7,562  | 6,250  | 6,021  | 5,753  | 4,857 | 3,345 | 2,665 | 1,980 | 8,184  | 10,416                          | 7,871  | 1,9994 |
| 0,1600                | 27,416 | 9,141  | 7,501  | 7,228  | 6,857  | 5,712 | 3,917 | 3,119 | 2,315 | 9,450  | 12,006                          | 9,469  | 2,5592 |
| 0,2000                | 32,262 | 10,710 | 8,772  | 8,424  | 7,964  | 6,472 | 4,402 | 3,496 | 2,582 | 10,605 | 13,457                          | 11,072 | 3,1990 |
| 0,2500                | 37,290 | 12,343 | 10,010 | 9,639  | 8,999  | 7,114 | 4,809 | 3,770 | 2,773 | 11,655 | 14,771                          | 12,714 | 3,9988 |
| 0,3200                | 42,341 | 13,821 | 11,241 | 10,728 | 9,815  | 7,520 | 5,018 | 3,913 | 2,858 | 12,560 | 15,953                          | 14,242 | 5,1184 |
| 0,4000                | 45,391 | 14,985 | 11,900 | 11,311 | 10,242 | 7,645 | 5,056 | 3,935 | 2,866 | 13,043 | 16,607                          | 15,101 | 6,3980 |
| 0,5000                | 46,957 | 15,603 | 12,122 | 11,533 | 10,319 | 7,588 | 5,005 | 3,908 | 2,848 | 13,196 | 16,847                          | 15,471 | 7,9975 |
| 0,6000                | 46,534 | 15,609 | 11,813 | 11,227 | 10,032 | 7,335 | 4,866 | 3,796 | 2,777 | 12,912 | 16,569                          | 15,147 | 9,5970 |
| 0,7000                | 44,543 | 15,307 | 11,259 | 10,700 | 9,576  | 6,993 | 4,679 | 3,642 | 2,691 | 12,442 | 15,989                          | 14,458 | 11,196 |
| 0,8000                | 41,998 | 14,739 | 10,653 | 10,160 | 9,079  | 6,639 | 4,493 | 3,506 | 2,604 | 11,905 | 15,282                          | 13,694 | 12,796 |
| 0,9000                | 39,414 | 14,048 | 10,065 | 9,593  | 8,530  | 6,292 | 4,293 | 3,392 | 2,520 | 11,367 | 14,576                          | 12,908 | 14,395 |
| 1,0000                | 37,256 | 13,471 | 9,615  | 9,124  | 8,129  | 6,020 | 4,147 | 3,304 | 2,454 | 10,873 | 13,928                          | 12,248 | 15,995 |
| 1,2500                | 32,694 | 12,242 | 8,716  | 8,322  | 7,394  | 5,546 | 3,894 | 3,144 | 2,375 | 9,848  | 12,505                          | 11,032 | 19,994 |
| 1,6000                | 27,644 | 10,825 | 7,816  | 7,474  | 6,691  | 5,107 | 3,663 | 2,978 | 2,306 | 8,715  | 10,905                          | 9,712  | 25,592 |
| 2,0000                | 23,317 | 9,558  | 7,085  | 6,747  | 6,105  | 4,742 | 3,464 | 2,844 | 2,236 | 7,772  | 9,574                           | 8,589  | 31,990 |
| 2,5000                | 19,307 | 8,300  | 6,339  | 6,032  | 5,567  | 4,403 | 3,269 | 2,722 | 2,166 | 6,875  | 8,320                           | 7,508  | 39,987 |
| 3,2000                | 15,777 | 7,010  | 5,558  | 5,306  | 4,927  | 3,989 | 3,034 | 2,524 | 2,024 | 5,964  | 7,109                           | 6,469  | 51,184 |
| 4,0000                | 13,103 | 5,924  | 4,844  | 4,646  | 4,368  | 3,574 | 2,740 | 2,307 | 1,866 | 5,186  | 6,111                           | 5,587  | 63,980 |
| 5,0000                | 10,990 | 4,994  | 4,178  | 4,023  | 3,791  | 3,142 | 2,443 | 2,063 | 1,693 | 4,472  | 5,236                           | 4,797  | 79,975 |
| 6,0000                | 9,520  | 4,329  | 3,680  | 3,539  | 3,352  | 2,798 | 2,186 | 1,858 | 1,531 | 3,931  | 4,589                           | 4,203  | 95,970 |
| 7,0000                | 8,440  | 3,832  | 3,294  | 3,175  | 3,002  | 2,524 | 1,985 | 1,694 | 1,399 | 3,516  | 4,094                           | 3,761  | 111,96 |
| 8,0000                | 7,590  | 3,433  | 2,983  | 2,879  | 2,719  | 2,294 | 1,805 | 1,548 | 1,286 | 3,181  | 3,695                           | 3,403  | 127,96 |
| 9,0000                | 6,886  | 3,129  | 2,725  | 2,631  | 2,489  | 2,105 | 1,659 | 1,425 | 1,190 | 2,901  | 3,365                           | 3,104  | 143,95 |
| 10,0000               | 6,315  | 2,883  | 2,515  | 2,429  | 2,298  | 1,943 | 1,535 | 1,320 | 1,105 | 2,670  | 3,092                           | 2,860  | 159,95 |
| 11,0000               | 5,828  | 2,673  | 2,337  | 2,257  | 2,135  | 1,805 | 1,430 | 1,230 | 1,030 | 2,474  | 2,863                           | 2,653  | 175,94 |
| 12,0000               | 5,407  | 2,491  | 2,183  | 2,108  | 1,994  | 1,686 | 1,340 | 1,153 | 0,966 | 2,306  | 2,663                           | 2,474  | 191,94 |



Таблица 42.16. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов кислорода  $^{16}\text{O}^+$  в различных веществах [1] $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al     | Ti     | Ni     | Ge     | Zr     | Ag     | Eu      | Ta      | Au                              | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------------------------------|---------|-----------|
| 0,0125                | 0,075  | 0,084  | 0,117  | 0,176  | 0,208  | 0,247  | 0,273  | 0,304  | 0,474   | 0,562   | 0,614                           | 0,736   | 0,1999    |
| 0,0160                | 0,090  | 0,101  | 0,141  | 0,212  | 0,251  | 0,295  | 0,324  | 0,360  | 0,561   | 0,663   | 0,725                           | 0,866   | 0,2559    |
| 0,0200                | 0,106  | 0,120  | 0,166  | 0,249  | 0,295  | 0,345  | 0,378  | 0,419  | 0,652   | 0,770   | 0,840                           | 1,002   | 0,3199    |
| 0,0250                | 0,123  | 0,141  | 0,194  | 0,291  | 0,346  | 0,402  | 0,440  | 0,486  | 0,756   | 0,891   | 0,971                           | 1,156   | 0,3999    |
| 0,0320                | 0,146  | 0,167  | 0,230  | 0,345  | 0,411  | 0,474  | 0,518  | 0,570  | 0,887   | 1,044   | 1,138                           | 1,250   | 0,5118    |
| 0,0400                | 0,168  | 0,195  | 0,267  | 0,400  | 0,478  | 0,549  | 0,598  | 0,657  | 1,023   | 1,202   | 1,309                           | 1,550   | 0,6398    |
| 0,0500                | 0,194  | 0,225  | 0,309  | 0,462  | 0,554  | 0,632  | 0,689  | 0,755  | 1,176   | 1,378   | 1,500                           | 1,773   | 0,7997    |
| 0,0600                | 0,218  | 0,253  | 0,348  | 0,519  | 0,623  | 0,709  | 0,771  | 0,844  | 1,314   | 1,538   | 1,673                           | 1,974   | 0,9597    |
| 0,0700                | 0,240  | 0,279  | 0,384  | 0,572  | 0,687  | 0,779  | 0,848  | 0,926  | 1,442   | 1,684   | 1,831                           | 2,158   | 1,1196    |
| 0,0800                | 0,262  | 0,304  | 0,418  | 0,622  | 0,746  | 0,845  | 0,919  | 1,003  | 1,560   | 1,819   | 1,977                           | 2,328   | 1,2796    |
| 0,0900                | 0,282  | 0,327  | 0,450  | 0,668  | 0,802  | 0,907  | 0,986  | 1,076  | 1,671   | 1,945   | 2,113                           | 2,486   | 1,4395    |
| 0,1000                | 0,301  | 0,349  | 0,481  | 0,714  | 0,856  | 0,966  | 1,050  | 1,144  | 1,775   | 2,064   | 2,241                           | 2,635   | 1,5995    |
| 0,1250                | 0,347  | 0,399  | 0,554  | 0,818  | 0,981  | 1,104  | 1,201  | 1,305  | 2,017   | 2,340   | 2,538                           | 2,978   | 1,9994    |
| 0,1600                | 0,406  | 0,462  | 0,648  | 0,950  | 1,139  | 1,279  | 1,390  | 1,507  | 2,316   | 2,682   | 2,903                           | 3,399   | 2,5592    |
| 0,2000                | 0,470  | 0,527  | 0,748  | 1,089  | 1,304  | 1,460  | 1,588  | 1,718  | 2,624   | 3,031   | 3,275                           | 3,825   | 3,1990    |
| 0,2500                | 0,548  | 0,602  | 0,867  | 1,251  | 1,495  | 1,671  | 1,818  | 1,963  | 2,974   | 3,428   | 3,699                           | 4,309   | 3,9988    |
| 0,3200                | 0,654  | 0,701  | 1,026  | 1,465  | 1,746  | 1,947  | 2,120  | 2,286  | 3,428   | 3,941   | 4,245                           | 4,932   | 5,1184    |
| 0,4000                | 0,774  | 0,810  | 1,204  | 1,699  | 2,019  | 2,246  | 2,448  | 2,637  | 3,915   | 4,488   | 4,827                           | 5,595   | 6,3980    |
| 0,5000                | 0,925  | 0,945  | 1,422  | 1,984  | 2,349  | 2,605  | 2,843  | 3,060  | 4,491   | 5,135   | 5,516                           | 6,379   | 7,9975    |
| 0,6000                | 1,079  | 1,082  | 1,640  | 2,264  | 2,671  | 2,956  | 3,228  | 3,474  | 5,047   | 5,758   | 6,178                           | 7,127   | 9,5970    |
| 0,7000                | 1,236  | 1,222  | 1,859  | 2,542  | 2,990  | 3,302  | 3,610  | 3,884  | 5,593   | 6,369   | 6,825                           | 7,856   | 11,196    |
| 0,8000                | 1,398  | 1,367  | 2,081  | 2,822  | 3,309  | 3,648  | 3,992  | 4,294  | 6,135   | 6,973   | 7,465                           | 8,577   | 12,796    |
| 0,9000                | 1,565  | 1,518  | 2,306  | 3,104  | 3,630  | 3,994  | 4,375  | 4,705  | 6,673   | 7,572   | 8,099                           | 9,290   | 14,395    |
| 1,0000                | 1,737  | 1,674  | 2,536  | 3,389  | 3,953  | 4,432  | 4,760  | 5,119  | 7,211   | 8,170   | 8,732                           | 9,999   | 15,995    |
| 1,2500                | 2,189  | 2,091  | 3,128  | 4,117  | 4,774  | 5,225  | 5,739  | 6,172  | 8,563   | 9,671   | 10,319                          | 11,774  | 19,994    |
| 1,6000                | 2,878  | 2,741  | 4,011  | 5,183  | 5,970  | 6,507  | 7,161  | 7,708  | 10,498  | 11,813  | 12,585                          | 14,303  | 25,592    |
| 2,0000                | 3,749  | 3,574  | 5,102  | 6,480  | 7,417  | 8,052  | 8,881  | 9,568  | 12,807  | 14,352  | 15,271                          | 17,291  | 31,990    |
| 2,5000                | 4,967  | 4,739  | 6,594  | 8,230  | 9,358  | 10,119 | 11,190 | 12,057 | 15,858  | 17,702  | 18,808                          | 21,202  | 39,987    |
| 3,2000                | 6,914  | 6,589  | 8,932  | 10,933 | 12,337 | 13,288 | 14,728 | 15,876 | 20,468  | 22,755  | 24,131                          | 27,067  | 51,184    |
| 4,0000                | 9,483  | 9,012  | 11,963 | 14,398 | 16,132 | 17,320 | 19,214 | 20,732 | 26,244  | 29,067  | 30,768                          | 34,367  | 63,980    |
| 5,0000                | 13,209 | 12,499 | 16,291 | 19,303 | 21,471 | 22,985 | 25,499 | 27,536 | 34,235  | 37,809  | 39,916                          | 44,407  | 79,975    |
| 6,0000                | 17,497 | 16,493 | 21,218 | 24,844 | 27,483 | 29,342 | 32,547 | 35,156 | 43,128  | 47,496  | 50,031                          | 55,451  | 95,970    |
| 7,0000                | 22,346 | 20,992 | 26,740 | 31,021 | 34,172 | 36,389 | 40,345 | 43,586 | 52,916  | 58,124  | 61,117                          | 67,505  | 111,96    |
| 8,0000                | 27,753 | 25,992 | 32,852 | 37,828 | 41,532 | 44,131 | 48,882 | 52,819 | 63,565  | 69,689  | 73,160                          | 80,579  | 127,96    |
| 9,0000                | 33,709 | 31,495 | 39,552 | 45,259 | 49,555 | 52,563 | 58,155 | 62,848 | 75,085  | 82,175  | 86,156                          | 94,653  | 143,95    |
| 10,0000               | 40,209 | 37,502 | 46,835 | 53,306 | 58,240 | 61,678 | 68,172 | 73,653 | 87,481  | 95,574  | 100,080                         | 109,714 | 159,95    |
| 11,0000               | 47,254 | 44,008 | 54,698 | 61,961 | 67,578 | 71,469 | 78,928 | 85,215 | 100,740 | 109,856 | 114,886                         | 125,760 | 175,94    |
| 12,0000               | 54,840 | 51,012 | 63,137 | 71,224 | 77,559 | 81,926 | 90,409 | 97,525 | 114,840 | 125,007 | 130,587                         | 142,791 | 191,94    |
| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar     | Kr     | Xe     | Rn      | Майлар  | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода    | $E$ , МэВ |
| 0,0125                | 0,027  | 0,070  | 0,101  | 0,107  | 0,119  | 0,185  | 0,316  | 0,466  | 0,729   | 0,081   | 0,063                           | 0,078   | 0,1999    |
| 0,0160                | 0,033  | 0,085  | 0,123  | 0,131  | 0,145  | 0,225  | 0,379  | 0,555  | 0,863   | 0,099   | 0,077                           | 0,096   | 0,2559    |
| 0,0200                | 0,040  | 0,102  | 0,147  | 0,156  | 0,174  | 0,266  | 0,444  | 0,645  | 0,998   | 0,118   | 0,092                           | 0,116   | 0,3199    |
| 0,0250                | 0,048  | 0,122  | 0,175  | 0,186  | 0,206  | 0,312  | 0,517  | 0,745  | 1,141   | 0,139   | 0,109                           | 0,138   | 0,3999    |
| 0,0320                | 0,058  | 0,149  | 0,212  | 0,224  | 0,249  | 0,370  | 0,605  | 0,865  | 1,309   | 0,167   | 0,131                           | 0,168   | 0,5118    |
| 0,0400                | 0,069  | 0,179  | 0,251  | 0,265  | 0,293  | 0,427  | 0,693  | 0,980  | 1,473   | 0,195   | 0,153                           | 0,199   | 0,6398    |
| 0,0500                | 0,082  | 0,214  | 0,296  | 0,311  | 0,343  | 0,491  | 0,787  | 1,102  | 1,643   | 0,228   | 0,179                           | 0,235   | 0,7997    |
| 0,0600                | 0,093  | 0,248  | 0,337  | 0,354  | 0,388  | 0,547  | 0,870  | 1,208  | 1,787   | 0,258   | 0,202                           | 0,268   | 0,9597    |
| 0,0700                | 0,104  | 0,279  | 0,376  | 0,394  | 0,430  | 0,597  | 0,944  | 1,302  | 1,914   | 0,285   | 0,224                           | 0,298   | 1,1196    |
| 0,0800                | 0,113  | 0,308  | 0,411  | 0,430  | 0,469  | 0,643  | 1,011  | 1,386  | 2,028   | 0,311   | 0,244                           | 0,326   | 1,2796    |
| 0,0900                | 0,123  | 0,335  | 0,444  | 0,464  | 0,504  | 0,685  | 1,073  | 1,464  | 2,134   | 0,335   | 0,263                           | 0,352   | 1,4395    |
| 0,1000                | 0,131  | 0,361  | 0,475  | 0,496  | 0,538  | 0,725  | 1,130  | 1,537  | 2,231   | 0,357   | 0,281                           | 0,377   | 1,5995    |
| 0,1250                | 0,150  | 0,418  | 0,544  | 0,567  | 0,613  | 0,814  | 1,259  | 1,698  | 2,449   | 0,409   | 0,322                           | 0,432   | 1,9994    |
| 0,1600                | 0,173  | 0,485  | 0,626  | 0,652  | 0,702  | 0,920  | 1,413  | 1,892  | 2,710   | 0,473   | 0,372                           | 0,496   | 2,5592    |
| 0,2000                | 0,194  | 0,550  | 0,705  | 0,734  | 0,788  | 1,025  | 1,567  | 2,085  | 2,971   | 0,537   | 0,422                           | 0,559   | 3,1990    |
| 0,2500                | 0,217  | 0,619  | 0,790  | 0,822  | 0,882  | 1,143  | 1,740  | 2,305  | 3,269   | 0,609   | 0,479                           | 0,626   | 3,9988    |
| 0,3200                | 0,245  | 0,705  | 0,895  | 0,932  | 1,001  | 1,295  | 1,968  | 2,596  | 3,666   | 0,701   | 0,551                           | 0,709   | 5,1184    |
| 0,4000                | 0,274  | 0,794  | 1,006  | 1,048  | 1,129  | 1,464  | 2,222  | 2,922  | 4,113   | 0,801   | 0,630                           | 0,796   | 6,3980    |
| 0,5000                | 0,309  | 0,898  | 1,139  | 1,188  | 1,284  | 1,674  | 2,539  | 3,329  | 4,672   | 0,923   | 0,725                           | 0,901   | 7,9975    |
| 0,6000                | 0,343  | 1,001  | 1,272  | 1,329  | 1,441  | 1,888  | 2,863  | 3,744  | 5,240   | 1,045   | 0,821                           | 1,005   | 9,5970    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar     | Kr     | Xe      | Rn      | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|------------|--------|-----------|
| 0,7000                | 0,378  | 1,104  | 1,411  | 1,475  | 1,604  | 2,111  | 3,198  | 4,174   | 5,825   | 1,171  | 0,919      | 1,113  | 11,196    |
| 0,8000                | 0,415  | 1,211  | 1,557  | 1,628  | 1,776  | 2,346  | 3,547  | 4,622   | 6,429   | 1,303  | 1,022      | 1,227  | 12,796    |
| 0,9000                | 0,455  | 1,322  | 1,711  | 1,790  | 1,958  | 2,593  | 3,911  | 5,085   | 7,054   | 1,440  | 1,129      | 1,347  | 14,395    |
| 1,0000                | 0,496  | 1,438  | 1,874  | 1,961  | 2,150  | 2,853  | 4,290  | 5,563   | 7,697   | 1,584  | 1,241      | 1,474  | 15,995    |
| 1,2500                | 0,611  | 1,749  | 2,311  | 2,420  | 2,665  | 3,545  | 5,285  | 6,803   | 9,353   | 1,970  | 1,544      | 1,818  | 19,994    |
| 1,6000                | 0,797  | 2,236  | 2,989  | 3,130  | 3,462  | 4,597  | 6,767  | 8,633   | 11,745  | 2,575  | 2,024      | 2,359  | 25,592    |
| 2,0000                | 1,049  | 2,865  | 3,849  | 4,031  | 4,463  | 5,898  | 8,564  | 10,831  | 14,563  | 3,353  | 2,650      | 3,060  | 31,990    |
| 2,5000                | 1,427  | 3,764  | 5,044  | 5,286  | 5,836  | 7,650  | 10,942 | 13,707  | 18,198  | 4,448  | 3,547      | 4,058  | 39,987    |
| 3,2000                | 2,070  | 5,235  | 6,934  | 7,269  | 7,978  | 10,325 | 14,502 | 17,983  | 23,551  | 6,200  | 5,006      | 5,667  | 51,184    |
| 4,0000                | 2,962  | 7,226  | 9,405  | 9,852  | 10,741 | 13,720 | 18,948 | 23,293  | 30,145  | 8,506  | 6,952      | 7,801  | 63,980    |
| 5,0000                | 4,299  | 10,175 | 12,970 | 13,561 | 14,682 | 18,505 | 25,143 | 30,640  | 39,159  | 11,836 | 9,787      | 10,898 | 79,975    |
| 6,0000                | 5,866  | 13,622 | 17,057 | 17,809 | 19,177 | 23,910 | 32,077 | 38,823  | 49,111  | 15,658 | 13,057     | 14,468 | 95,970    |
| 7,0000                | 7,653  | 17,556 | 21,658 | 22,587 | 24,227 | 29,938 | 39,767 | 47,852  | 60,055  | 19,967 | 16,753     | 18,497 | 111,96    |
| 8,0000                | 9,654  | 21,971 | 26,767 | 27,884 | 29,833 | 36,593 | 48,227 | 57,743  | 71,992  | 24,756 | 20,871     | 22,974 | 127,96    |
| 9,0000                | 11,869 | 26,856 | 32,383 | 33,703 | 35,988 | 43,879 | 57,480 | 68,522  | 84,938  | 30,028 | 25,412     | 27,900 | 143,95    |
| 10,0000               | 14,297 | 32,186 | 38,498 | 40,036 | 42,682 | 51,795 | 67,512 | 80,194  | 98,903  | 35,780 | 30,375     | 33,273 | 159,95    |
| 11,0000               | 16,935 | 37,953 | 45,100 | 46,873 | 49,908 | 60,342 | 78,312 | 92,754  | 113,908 | 42,008 | 35,755     | 39,084 | 175,94    |
| 12,0000               | 19,786 | 44,156 | 52,186 | 54,211 | 57,665 | 69,515 | 89,873 | 106,192 | 129,952 | 48,709 | 41,551     | 45,331 | 191,94    |

Таблица 42.17. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов фтора  $^{19}F^+$  [1]  
 $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|---------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125              | 3,408  | 2,819  | 2,066 | 1,374 | 1,115 | 1,012 | 0,938 | 0,868 | 0,551 | 0,472 | 0,434 | 0,372 | 0,2375    |
| 0,0160              | 3,856  | 3,190  | 2,337 | 1,554 | 1,262 | 1,145 | 1,061 | 0,981 | 0,624 | 0,534 | 0,491 | 0,421 | 0,3040    |
| 0,0200              | 4,311  | 3,566  | 2,613 | 1,737 | 1,411 | 1,280 | 1,186 | 1,097 | 0,698 | 0,597 | 0,549 | 0,470 | 0,3800    |
| 0,0250              | 4,820  | 3,987  | 2,921 | 1,943 | 1,577 | 1,431 | 1,326 | 1,227 | 0,780 | 0,667 | 0,615 | 0,526 | 0,4749    |
| 0,0320              | 5,446  | 4,514  | 3,305 | 2,198 | 1,788 | 1,626 | 1,500 | 1,388 | 0,882 | 0,757 | 0,697 | 0,598 | 0,6079    |
| 0,0400              | 6,074  | 5,058  | 3,695 | 2,464 | 2,010 | 1,833 | 1,689 | 1,563 | 0,994 | 0,855 | 0,787 | 0,676 | 0,7599    |
| 0,0500              | 6,767  | 5,672  | 4,131 | 2,768 | 2,268 | 2,066 | 1,904 | 1,764 | 1,120 | 0,973 | 0,896 | 0,770 | 0,9499    |
| 0,0600              | 7,350  | 6,220  | 4,504 | 3,036 | 2,495 | 2,265 | 2,094 | 1,941 | 1,243 | 1,081 | 0,998 | 0,858 | 1,1399    |
| 0,0700              | 7,862  | 6,725  | 4,838 | 3,280 | 2,710 | 2,458 | 2,274 | 2,110 | 1,355 | 1,185 | 1,098 | 0,943 | 1,3299    |
| 0,0800              | 8,319  | 7,208  | 5,141 | 3,512 | 2,905 | 2,632 | 2,432 | 2,262 | 1,465 | 1,285 | 1,188 | 1,023 | 1,5198    |
| 0,0900              | 8,727  | 7,660  | 5,417 | 3,727 | 3,088 | 2,806 | 2,584 | 2,405 | 1,576 | 1,379 | 1,279 | 1,102 | 1,7098    |
| 0,1000              | 9,100  | 8,091  | 5,670 | 3,929 | 3,266 | 2,960 | 2,722 | 2,546 | 1,678 | 1,469 | 1,361 | 1,174 | 1,8998    |
| 0,1250              | 9,882  | 9,117  | 6,125 | 4,375 | 3,654 | 3,313 | 3,045 | 2,853 | 1,911 | 1,672 | 1,563 | 1,352 | 2,3747    |
| 0,1600              | 10,685 | 10,386 | 6,810 | 4,876 | 4,100 | 3,718 | 3,412 | 3,201 | 2,179 | 1,914 | 1,794 | 1,566 | 3,0397    |
| 0,2000              | 11,313 | 11,481 | 7,308 | 5,313 | 4,495 | 4,071 | 3,734 | 3,501 | 2,426 | 2,141 | 2,010 | 1,754 | 3,7996    |
| 0,2500              | 11,781 | 12,392 | 7,735 | 5,717 | 4,858 | 4,409 | 4,038 | 3,783 | 2,669 | 2,359 | 2,212 | 1,934 | 4,7495    |
| 0,3200              | 12,090 | 13,135 | 8,103 | 6,102 | 5,210 | 4,757 | 4,335 | 4,052 | 2,901 | 2,577 | 2,419 | 2,127 | 6,0794    |
| 0,4000              | 12,195 | 13,538 | 8,341 | 6,356 | 5,472 | 5,005 | 4,563 | 4,262 | 3,103 | 2,761 | 2,594 | 2,277 | 7,5992    |
| 0,5000              | 12,162 | 13,668 | 8,505 | 6,574 | 5,698 | 5,231 | 4,763 | 4,440 | 3,283 | 2,926 | 2,751 | 2,424 | 9,4990    |
| 0,6000              | 11,924 | 13,430 | 8,505 | 6,660 | 5,801 | 5,341 | 4,848 | 4,516 | 3,377 | 3,019 | 2,845 | 2,526 | 11,399    |
| 0,7000              | 11,647 | 13,074 | 8,446 | 6,672 | 5,836 | 5,380 | 4,873 | 4,544 | 3,429 | 3,066 | 2,897 | 2,568 | 13,299    |
| 0,8000              | 11,339 | 12,642 | 8,350 | 6,655 | 5,837 | 5,402 | 4,885 | 4,551 | 3,457 | 3,106 | 2,931 | 2,605 | 15,198    |
| 0,9000              | 11,047 | 12,208 | 8,232 | 6,602 | 5,820 | 5,400 | 4,873 | 4,536 | 3,482 | 3,128 | 2,955 | 2,634 | 17,098    |
| 1,0000              | 10,749 | 11,769 | 8,100 | 6,553 | 5,783 | 5,370 | 4,852 | 4,512 | 3,483 | 3,135 | 2,965 | 2,649 | 18,998    |
| 1,2500              | 10,046 | 10,758 | 7,745 | 6,351 | 5,654 | 5,267 | 4,748 | 4,407 | 3,462 | 3,121 | 2,951 | 2,641 | 23,747    |
| 1,6000              | 9,176  | 9,618  | 7,248 | 6,052 | 5,407 | 5,052 | 4,552 | 4,204 | 3,370 | 3,051 | 2,885 | 2,587 | 30,397    |
| 2,0000              | 8,330  | 8,693  | 6,723 | 5,694 | 5,116 | 4,800 | 4,303 | 3,987 | 3,227 | 2,945 | 2,783 | 2,508 | 37,996    |
| 2,5000              | 7,459  | 7,816  | 6,149 | 5,282 | 4,778 | 4,489 | 4,015 | 3,726 | 3,062 | 2,786 | 2,644 | 2,398 | 47,495    |
| 3,2000              | 6,520  | 6,888  | 5,484 | 4,771 | 4,343 | 4,085 | 3,663 | 3,389 | 2,830 | 2,588 | 2,457 | 2,232 | 60,794    |
| 4,0000              | 5,706  | 6,077  | 4,877 | 4,287 | 3,926 | 3,697 | 3,331 | 3,073 | 2,600 | 2,380 | 2,268 | 2,063 | 75,992    |
| 5,0000              | 4,945  | 5,300  | 4,285 | 3,796 | 3,496 | 3,299 | 2,974 | 2,751 | 2,357 | 2,151 | 2,061 | 1,881 | 94,990    |
| 6,0000              | 4,372  | 4,701  | 3,822 | 3,409 | 3,145 | 2,981 | 2,691 | 2,488 | 2,133 | 1,968 | 1,884 | 1,731 | 113,99    |
| 7,0000              | 3,912  | 4,226  | 3,450 | 3,091 | 2,857 | 2,715 | 2,456 | 2,274 | 1,967 | 1,808 | 1,735 | 1,597 | 132,99    |
| 8,0000              | 3,544  | 3,837  | 3,145 | 2,830 | 2,620 | 2,491 | 2,264 | 2,091 | 1,818 | 1,676 | 1,610 | 1,484 | 151,98    |
| 9,0000              | 3,245  | 3,511  | 2,890 | 2,609 | 2,419 | 2,303 | 2,095 | 1,939 | 1,690 | 1,560 | 1,500 | 1,387 | 170,98    |
| 10,0000             | 2,988  | 3,234  | 2,673 | 2,424 | 2,245 | 2,141 | 1,949 | 1,810 | 1,577 | 1,462 | 1,409 | 1,302 | 189,98    |
| 11,0000             | 2,770  | 3,002  | 2,487 | 2,263 | 2,099 | 2,002 | 1,823 | 1,698 | 1,482 | 1,378 | 1,330 | 1,226 | 208,98    |
| 12,0000             | 2,583  | 2,797  | 2,325 | 2,120 | 1,969 | 1,881 | 1,713 | 1,600 | 1,397 | 1,302 | 1,255 | 1,158 | 227,98    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|--------|-----------|
| 0,0125                  | 7,746  | 3,305  | 2,189  | 2,057  | 1,828  | 1,206 | 0,739 | 0,525 | 0,346 | 2,770  | 3,524      | 2,689  | 0,2375    |
| 0,0160                  | 8,600  | 3,627  | 2,437  | 2,292  | 2,038  | 1,376 | 0,853 | 0,608 | 0,403 | 3,115  | 3,963      | 2,994  | 0,3040    |
| 0,0200                  | 9,353  | 3,841  | 2,657  | 2,503  | 2,239  | 1,555 | 0,969 | 0,705 | 0,472 | 3,454  | 4,392      | 3,263  | 0,3800    |
| 0,0250                  | 10,165 | 4,034  | 2,898  | 2,731  | 2,471  | 1,773 | 1,133 | 0,827 | 0,599 | 3,827  | 4,869      | 3,558  | 0,4749    |
| 0,0320                  | 11,269 | 4,276  | 3,169  | 3,017  | 2,756  | 2,066 | 1,342 | 1,011 | 0,704 | 4,296  | 5,479      | 3,933  | 0,6079    |
| 0,0400                  | 12,378 | 4,500  | 3,447  | 3,318  | 3,056  | 2,387 | 1,581 | 1,212 | 0,861 | 4,785  | 6,104      | 4,323  | 0,7599    |
| 0,0500                  | 13,674 | 4,808  | 3,796  | 3,693  | 3,437  | 2,772 | 1,867 | 1,454 | 1,053 | 5,346  | 6,816      | 4,800  | 0,9499    |
| 0,0600                  | 15,043 | 5,148  | 4,175  | 4,035  | 3,815  | 3,139 | 2,135 | 1,680 | 1,234 | 5,860  | 7,481      | 5,261  | 1,1399    |
| 0,0700                  | 16,402 | 5,554  | 4,548  | 4,417  | 4,190  | 3,493 | 2,380 | 1,892 | 1,398 | 6,358  | 8,109      | 5,748  | 1,3299    |
| 0,0800                  | 17,840 | 5,990  | 4,941  | 4,802  | 4,571  | 3,841 | 2,632 | 2,098 | 1,558 | 6,848  | 8,725      | 6,252  | 1,5198    |
| 0,0900                  | 19,232 | 6,452  | 5,336  | 5,201  | 4,951  | 4,177 | 2,871 | 2,297 | 1,701 | 7,324  | 9,312      | 6,761  | 1,7098    |
| 0,1000                  | 20,752 | 6,963  | 5,772  | 5,591  | 5,318  | 4,508 | 3,113 | 2,478 | 1,837 | 7,785  | 9,900      | 7,275  | 1,8998    |
| 0,1250                  | 24,673 | 8,235  | 6,805  | 6,557  | 6,265  | 5,289 | 3,642 | 2,902 | 2,157 | 8,912  | 11,342     | 8,570  | 2,3747    |
| 0,1600                  | 30,169 | 10,059 | 8,254  | 7,954  | 7,546  | 6,286 | 4,311 | 3,432 | 2,547 | 10,399 | 13,212     | 10,470 | 3,0397    |
| 0,2000                  | 35,883 | 11,912 | 9,756  | 9,369  | 8,858  | 7,199 | 4,896 | 3,888 | 2,872 | 11,795 | 14,967     | 12,314 | 3,7996    |
| 0,2500                  | 41,926 | 13,877 | 11,255 | 10,837 | 10,118 | 7,998 | 5,407 | 4,239 | 3,117 | 13,104 | 16,608     | 14,295 | 4,7495    |
| 0,3200                  | 48,133 | 15,712 | 12,779 | 12,195 | 11,158 | 8,549 | 5,705 | 4,449 | 3,249 | 14,278 | 18,135     | 16,190 | 6,0794    |
| 0,4000                  | 52,050 | 17,183 | 13,646 | 12,971 | 11,745 | 8,767 | 5,797 | 4,513 | 3,286 | 14,956 | 19,043     | 17,317 | 7,5992    |
| 0,5000                  | 54,262 | 18,031 | 14,008 | 13,327 | 11,924 | 8,769 | 5,783 | 4,516 | 3,291 | 15,249 | 19,468     | 17,877 | 9,4990    |
| 0,6000                  | 54,009 | 18,116 | 13,711 | 13,030 | 11,644 | 8,514 | 5,648 | 4,406 | 3,224 | 14,986 | 19,230     | 17,580 | 11,399    |
| 0,7000                  | 51,858 | 17,821 | 13,108 | 12,458 | 11,149 | 8,142 | 5,448 | 4,240 | 3,133 | 14,485 | 18,665     | 16,833 | 13,299    |
| 0,8000                  | 49,015 | 17,201 | 12,433 | 11,857 | 10,596 | 7,749 | 5,244 | 4,092 | 3,039 | 13,894 | 17,836     | 15,982 | 15,198    |
| 0,9000                  | 46,098 | 16,431 | 11,771 | 11,220 | 9,977  | 7,359 | 5,021 | 3,968 | 2,947 | 13,294 | 17,048     | 15,097 | 17,098    |
| 1,0000                  | 43,659 | 15,787 | 11,267 | 10,692 | 9,526  | 7,055 | 4,860 | 3,872 | 2,876 | 12,741 | 16,322     | 14,353 | 18,998    |
| 1,2500                  | 38,494 | 14,414 | 10,262 | 9,798  | 8,706  | 6,529 | 4,585 | 3,702 | 2,796 | 11,595 | 14,724     | 12,989 | 23,747    |
| 1,6000                  | 32,760 | 12,828 | 9,263  | 8,857  | 7,929  | 6,052 | 4,341 | 3,532 | 2,732 | 10,328 | 12,923     | 11,509 | 30,397    |
| 2,0000                  | 27,833 | 11,409 | 8,458  | 8,054  | 7,288  | 5,661 | 4,135 | 3,395 | 2,669 | 9,278  | 11,429     | 10,253 | 37,996    |
| 2,5000                  | 23,244 | 9,992  | 7,631  | 7,262  | 6,703  | 5,301 | 3,935 | 3,278 | 2,607 | 8,277  | 10,017     | 9,039  | 47,495    |
| 3,2000                  | 19,193 | 8,527  | 6,761  | 6,454  | 5,994  | 4,853 | 3,691 | 3,071 | 2,462 | 7,255  | 8,648      | 7,869  | 60,794    |
| 4,0000                  | 16,095 | 7,277  | 5,950  | 5,706  | 5,365  | 4,389 | 3,365 | 2,834 | 2,292 | 6,70   | 7,506      | 6,862  | 75,992    |
| 5,0000                  | 13,626 | 6,192  | 5,180  | 4,988  | 4,701  | 3,895 | 3,029 | 2,558 | 2,100 | 5,545  | 6,492      | 5,947  | 94,990    |
| 6,0000                  | 11,886 | 5,404  | 4,594  | 4,418  | 4,185  | 3,493 | 2,729 | 2,320 | 1,911 | 4,907  | 5,729      | 5,247  | 113,99    |
| 7,0000                  | 10,592 | 4,809  | 4,133  | 3,985  | 3,767  | 3,167 | 2,491 | 2,125 | 1,756 | 4,413  | 5,137      | 4,720  | 132,99    |
| 8,0000                  | 9,560  | 4,324  | 3,758  | 3,626  | 3,425  | 2,890 | 2,274 | 1,950 | 1,620 | 4,006  | 4,654      | 4,286  | 151,98    |
| 9,0000                  | 8,698  | 3,953  | 3,442  | 3,323  | 3,144  | 2,658 | 2,095 | 1,800 | 1,503 | 3,664  | 4,251      | 3,921  | 170,98    |
| 10,0000                 | 7,992  | 3,649  | 3,184  | 3,074  | 2,908  | 2,459 | 1,943 | 1,671 | 1,398 | 3,379  | 3,913      | 3,619  | 189,88    |
| 11,0000                 | 7,386  | 3,387  | 2,962  | 2,860  | 2,706  | 2,288 | 1,813 | 1,559 | 1,306 | 3,136  | 3,628      | 3,362  | 208,98    |
| 12,0000                 | 6,858  | 3,160  | 2,769  | 2,674  | 2,529  | 2,139 | 1,700 | 1,462 | 1,225 | 2,925  | 3,378      | 3,139  | 227,98    |

Т а б л и ц а 42.18. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов фтора  $^{19}F^+$  в различных веществах [1]  
 $E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                  | 0,081 | 0,090 | 0,125 | 0,167 | 0,219 | 0,260 | 0,287 | 0,321 | 0,497 | 0,589 | 0,644 | 0,773 | 0,2375    |
| 0,0160                  | 0,098 | 0,109 | 0,151 | 0,225 | 0,265 | 0,313 | 0,344 | 0,382 | 0,592 | 0,700 | 0,765 | 0,916 | 0,3040    |
| 0,0200                  | 0,115 | 0,130 | 0,179 | 0,266 | 0,314 | 0,368 | 0,403 | 0,447 | 0,692 | 0,817 | 0,891 | 1,064 | 0,3800    |
| 0,0250                  | 0,135 | 0,153 | 0,210 | 0,313 | 0,371 | 0,431 | 0,471 | 0,521 | 0,806 | 0,950 | 1,036 | 1,234 | 0,4749    |
| 0,0320                  | 0,160 | 0,183 | 0,251 | 0,373 | 0,443 | 0,512 | 0,558 | 0,614 | 0,952 | 1,119 | 1,219 | 1,449 | 0,6079    |
| 0,0400                  | 0,186 | 0,214 | 0,292 | 0,434 | 0,517 | 0,594 | 0,648 | 0,711 | 1,102 | 1,294 | 1,409 | 1,670 | 0,7599    |
| 0,0500                  | 0,215 | 0,248 | 0,339 | 0,504 | 0,601 | 0,687 | 0,748 | 0,820 | 1,272 | 1,490 | 1,621 | 1,917 | 0,9499    |
| 0,0600                  | 0,241 | 0,279 | 0,382 | 0,567 | 0,678 | 0,772 | 0,840 | 0,919 | 1,425 | 1,666 | 1,812 | 2,140 | 1,1399    |
| 0,0700                  | 0,266 | 0,308 | 0,421 | 0,626 | 0,748 | 0,850 | 0,924 | 1,010 | 1,566 | 1,828 | 1,986 | 2,343 | 1,3299    |
| 0,0800                  | 0,289 | 0,335 | 0,459 | 0,680 | 0,814 | 0,923 | 1,003 | 1,094 | 1,697 | 1,977 | 2,147 | 2,529 | 1,5198    |
| 0,0900                  | 0,311 | 0,360 | 0,494 | 0,732 | 0,876 | 0,991 | 1,077 | 1,174 | 1,818 | 2,115 | 2,297 | 2,703 | 1,7098    |
| 0,1000                  | 0,333 | 0,384 | 0,528 | 0,781 | 0,934 | 1,056 | 1,147 | 1,249 | 1,932 | 2,246 | 2,437 | 2,866 | 1,8998    |
| 0,1250                  | 0,383 | 0,440 | 0,608 | 0,895 | 1,069 | 1,207 | 1,311 | 1,425 | 2,192 | 2,542 | 2,756 | 3,235 | 2,3747    |
| 0,1600                  | 0,447 | 0,508 | 0,710 | 1,039 | 1,238 | 1,396 | 1,517 | 1,645 | 2,513 | 2,908 | 3,146 | 3,685 | 3,0397    |
| 0,2000                  | 0,516 | 0,577 | 0,818 | 1,188 | 1,413 | 1,591 | 1,730 | 1,871 | 2,839 | 3,279 | 3,541 | 4,137 | 3,7996    |
| 0,2500                  | 0,598 | 0,657 | 0,944 | 1,360 | 1,615 | 1,815 | 1,974 | 2,132 | 3,209 | 3,697 | 3,987 | 4,648 | 4,7495    |
| 0,3200                  | 0,710 | 0,761 | 1,111 | 1,584 | 1,879 | 2,105 | 2,291 | 2,471 | 3,686 | 4,235 | 4,561 | 5,302 | 6,0794    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al     | Ti     | Ni     | Ge     | Zr     | Ag     | Eu      | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,4000                | 0,834  | 0,875  | 1,296  | 1,828  | 2,163  | 2,416  | 2,632  | 2,836  | 4,191   | 4,804   | 5,167   | 5,992   | 7,5992    |
| 0,5000                | 0,990  | 1,014  | 1,521  | 2,122  | 2,503  | 2,787  | 3,039  | 3,272  | 4,786   | 5,472   | 5,877   | 6,799   | 9,4990    |
| 0,6000                | 1,148  | 1,154  | 1,745  | 2,409  | 2,833  | 3,146  | 3,434  | 3,696  | 5,356   | 6,111   | 6,556   | 7,567   | 11,399    |
| 0,7000                | 1,309  | 1,298  | 1,969  | 2,693  | 3,159  | 3,500  | 3,825  | 4,115  | 5,914   | 6,735   | 7,217   | 8,312   | 13,299    |
| 0,8000                | 1,474  | 1,445  | 2,195  | 2,978  | 3,485  | 3,853  | 4,214  | 4,533  | 6,466   | 7,350   | 7,869   | 9,046   | 15,198    |
| 0,9000                | 1,644  | 1,598  | 2,424  | 3,265  | 3,811  | 4,204  | 4,604  | 4,951  | 7,013   | 7,960   | 8,514   | 9,772   | 17,098    |
| 1,0000                | 1,818  | 1,757  | 2,656  | 3,554  | 4,138  | 4,557  | 4,994  | 5,371  | 7,559   | 8,566   | 9,156   | 10,491  | 18,998    |
| 1,2500                | 2,275  | 2,179  | 3,256  | 4,290  | 4,968  | 5,450  | 5,984  | 6,436  | 8,926   | 10,084  | 10,761  | 12,285  | 23,747    |
| 1,6000                | 2,968  | 2,832  | 4,144  | 5,362  | 6,171  | 6,739  | 7,414  | 7,980  | 10,872  | 12,238  | 13,040  | 14,828  | 30,397    |
| 2,0000                | 3,838  | 3,664  | 5,233  | 6,657  | 7,616  | 8,282  | 9,131  | 9,837  | 13,177  | 14,773  | 15,722  | 17,812  | 37,996    |
| 2,5000                | 5,044  | 4,818  | 6,711  | 8,390  | 9,539  | 10,330 | 11,418 | 12,303 | 16,200  | 18,092  | 19,225  | 21,687  | 47,495    |
| 3,2000                | 6,954  | 6,633  | 9,005  | 11,043 | 12,462 | 13,439 | 14,890 | 16,051 | 20,723  | 23,050  | 24,449  | 27,441  | 60,794    |
| 4,0000                | 9,451  | 8,987  | 11,949 | 14,409 | 16,148 | 17,356 | 19,248 | 20,768 | 26,334  | 29,181  | 30,896  | 34,533  | 75,992    |
| 5,0000                | 13,035 | 12,341 | 16,113 | 19,128 | 21,286 | 22,806 | 25,295 | 27,314 | 34,023  | 37,593  | 39,698  | 44,193  | 94,990    |
| 6,0000                | 17,128 | 16,154 | 20,816 | 24,417 | 27,023 | 28,873 | 32,022 | 34,587 | 42,510  | 46,839  | 49,352  | 54,734  | 113,99    |
| 7,0000                | 21,728 | 20,422 | 26,055 | 30,277 | 33,369 | 35,559 | 39,421 | 42,585 | 51,798  | 56,922  | 59,870  | 66,171  | 132,99    |
| 8,0000                | 26,836 | 25,145 | 31,829 | 36,707 | 40,321 | 42,872 | 47,484 | 51,306 | 61,856  | 67,846  | 71,246  | 78,520  | 151,98    |
| 9,0000                | 32,443 | 30,326 | 38,136 | 43,704 | 47,876 | 50,812 | 56,215 | 60,749 | 72,703  | 79,602  | 83,482  | 91,771  | 170,98    |
| 10,0000               | 38,548 | 35,968 | 44,977 | 51,263 | 56,034 | 59,373 | 65,624 | 70,898 | 84,347  | 92,188  | 96,561  | 105,919 | 189,98    |
| 11,0000               | 45,156 | 42,070 | 52,351 | 59,379 | 64,791 | 68,556 | 75,711 | 81,741 | 96,780  | 105,582 | 110,446 | 120,966 | 208,98    |
| 12,0000               | 52,262 | 48,631 | 60,257 | 68,056 | 74,141 | 78,352 | 86,467 | 93,273 | 109,989 | 119,774 | 125,154 | 136,920 | 227,98    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar     | Kr     | Xe      | Rn      | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода   | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------------------------------|--------|-----------|
| 0,0125                | 0,029  | 0,076  | 0,108  | 0,114  | 0,126  | 0,196  | 0,331  | 0,487   | 0,760   | 0,087  | 0,068                           | 0,084  | 0,2375    |
| 0,0160                | 0,036  | 0,093  | 0,133  | 0,140  | 0,156  | 0,239  | 0,399  | 0,583   | 0,905   | 0,107  | 0,084                           | 0,104  | 0,3040    |
| 0,0200                | 0,044  | 0,111  | 0,159  | 0,168  | 0,187  | 0,284  | 0,471  | 0,682   | 1,052   | 0,128  | 0,100                           | 0,125  | 0,3800    |
| 0,0250                | 0,052  | 0,134  | 0,190  | 0,201  | 0,223  | 0,335  | 0,551  | 0,792   | 1,209   | 0,152  | 0,119                           | 0,150  | 0,4749    |
| 0,0320                | 0,064  | 0,164  | 0,231  | 0,244  | 0,270  | 0,399  | 0,649  | 0,925   | 1,395   | 0,182  | 0,144                           | 0,183  | 0,6079    |
| 0,0400                | 0,076  | 0,197  | 0,274  | 0,289  | 0,319  | 0,463  | 0,747  | 1,053   | 1,576   | 0,214  | 0,169                           | 0,218  | 0,7599    |
| 0,0500                | 0,090  | 0,236  | 0,325  | 0,341  | 0,375  | 0,534  | 0,852  | 1,189   | 1,765   | 0,251  | 0,197                           | 0,258  | 0,9499    |
| 0,0600                | 0,103  | 0,273  | 0,371  | 0,389  | 0,426  | 0,596  | 0,943  | 1,306   | 1,925   | 0,284  | 0,223                           | 0,295  | 1,1399    |
| 0,0700                | 0,114  | 0,308  | 0,413  | 0,432  | 0,472  | 0,652  | 1,025  | 1,409   | 2,066   | 0,314  | 0,247                           | 0,328  | 1,3299    |
| 0,0800                | 0,125  | 0,340  | 0,452  | 0,473  | 0,514  | 0,703  | 1,099  | 1,502   | 2,191   | 0,342  | 0,269                           | 0,359  | 1,5198    |
| 0,0900                | 0,135  | 0,370  | 0,489  | 0,510  | 0,553  | 0,749  | 1,167  | 1,587   | 2,305   | 0,369  | 0,290                           | 0,388  | 1,7098    |
| 0,1000                | 0,145  | 0,398  | 0,522  | 0,545  | 0,590  | 0,793  | 1,230  | 1,667   | 2,413   | 0,394  | 0,310                           | 0,415  | 1,8998    |
| 0,1250                | 0,165  | 0,461  | 0,598  | 0,623  | 0,672  | 0,890  | 1,371  | 1,844   | 2,651   | 0,451  | 0,354                           | 0,475  | 2,3747    |
| 0,1600                | 0,190  | 0,534  | 0,687  | 0,715  | 0,768  | 1,005  | 1,539  | 2,054   | 2,934   | 0,520  | 0,409                           | 0,545  | 3,0397    |
| 0,2000                | 0,213  | 0,603  | 0,771  | 0,803  | 0,861  | 1,118  | 1,704  | 2,261   | 3,215   | 0,588  | 0,462                           | 0,612  | 3,7996    |
| 0,2500                | 0,237  | 0,677  | 0,862  | 0,897  | 0,961  | 1,243  | 1,888  | 2,495   | 3,531   | 0,664  | 0,523                           | 0,683  | 4,7495    |
| 0,3200                | 0,267  | 0,767  | 0,972  | 1,012  | 1,086  | 1,404  | 2,127  | 2,801   | 3,948   | 0,761  | 0,599                           | 0,771  | 6,0794    |
| 0,4000                | 0,297  | 0,859  | 1,087  | 1,133  | 1,219  | 1,579  | 2,391  | 3,139   | 4,413   | 0,865  | 0,681                           | 0,861  | 7,5992    |
| 0,5000                | 0,333  | 0,967  | 1,224  | 1,277  | 1,379  | 1,795  | 2,718  | 3,560   | 4,990   | 0,991  | 0,779                           | 0,969  | 9,4990    |
| 0,6000                | 0,368  | 1,072  | 1,361  | 1,421  | 1,540  | 2,015  | 3,051  | 3,985   | 5,573   | 1,117  | 0,877                           | 1,076  | 11,399    |
| 0,7000                | 0,404  | 1,178  | 1,503  | 1,570  | 1,707  | 2,243  | 3,393  | 4,425   | 6,170   | 1,245  | 0,978                           | 1,187  | 13,299    |
| 0,8000                | 0,441  | 1,286  | 1,652  | 1,727  | 1,882  | 2,482  | 3,748  | 4,881   | 6,785   | 1,379  | 1,082                           | 1,302  | 15,198    |
| 0,9000                | 0,481  | 1,399  | 1,809  | 1,891  | 2,066  | 2,734  | 4,118  | 5,352   | 7,420   | 1,519  | 1,191                           | 1,425  | 17,098    |
| 1,0000                | 0,524  | 1,517  | 1,974  | 2,065  | 2,261  | 2,997  | 4,503  | 5,837   | 8,073   | 1,665  | 1,305                           | 1,554  | 18,998    |
| 1,2500                | 0,640  | 1,832  | 2,415  | 2,529  | 2,783  | 3,697  | 5,509  | 7,091   | 9,747   | 2,056  | 1,611                           | 1,901  | 23,747    |
| 1,6000                | 0,827  | 2,321  | 3,097  | 3,243  | 3,583  | 4,755  | 6,999  | 8,930   | 12,152  | 2,664  | 2,093                           | 2,445  | 30,397    |
| 2,0000                | 1,079  | 2,950  | 3,957  | 4,143  | 4,583  | 6,054  | 8,793  | 11,126  | 14,966  | 3,440  | 2,719                           | 3,145  | 37,996    |
| 2,5000                | 1,453  | 3,840  | 5,140  | 5,386  | 5,944  | 7,789  | 11,149 | 13,974  | 18,568  | 4,525  | 3,608                           | 4,133  | 47,495    |
| 3,2000                | 2,084  | 5,284  | 6,994  | 7,332  | 8,045  | 10,414 | 14,642 | 18,170  | 23,821  | 6,244  | 5,039                           | 5,713  | 60,794    |
| 4,0000                | 2,950  | 7,217  | 9,395  | 9,840  | 10,730 | 13,712 | 18,961 | 23,329  | 30,226  | 8,484  | 6,929                           | 7,785  | 75,992    |
| 5,0000                | 4,236  | 10,054 | 12,824 | 13,409 | 14,521 | 18,316 | 24,922 | 30,398  | 38,899  | 11,688 | 9,657                           | 10,765 | 94,990    |
| 6,0000                | 5,732  | 13,344 | 16,725 | 17,463 | 18,811 | 23,475 | 31,540 | 38,208  | 48,398  | 15,337 | 12,778                          | 14,172 | 113,99    |
| 7,0000                | 7,427  | 17,076 | 21,091 | 21,997 | 23,602 | 29,194 | 38,836 | 46,774  | 58,781  | 19,425 | 16,285                          | 17,995 | 132,99    |
| 8,0000                | 9,318  | 21,247 | 25,917 | 27,001 | 28,897 | 35,480 | 46,827 | 56,117  | 70,057  | 23,948 | 20,174                          | 22,223 | 151,98    |
| 9,0000                | 11,403 | 25,847 | 31,204 | 32,479 | 34,692 | 42,340 | 55,539 | 66,266  | 82,245  | 28,911 | 24,450                          | 26,862 | 170,98    |
| 10,0000               | 13,683 | 30,853 | 36,948 | 38,427 | 40,980 | 49,776 | 64,962 | 77,229  | 95,363  | 34,315 | 29,111                          | 31,909 | 189,98    |
| 11,0000               | 16,158 | 36,261 | 43,139 | 44,839 | 47,757 | 57,791 | 75,091 | 89,008  | 109,434 | 40,156 | 34,157                          | 37,358 | 208,98    |
| 12,0000               | 18,829 | 42,072 | 49,777 | 51,714 | 55,023 | 66,384 | 85,920 | 101,596 | 124,464 | 46,432 | 39,586                          | 43,210 | 227,98    |

Таблица 42.19. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см<sup>-2</sup>), для ионов неона <sup>20</sup>Ne<sup>+</sup> [1]

$E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | Be     | C      | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                  | 3,548  | 2,935  | 2,150 | 1,430 | 1,161 | 1,054 | 0,976 | 0,903 | 0,574 | 0,491 | 0,452 | 0,387 | 0,2499    |
| 0,0160                  | 4,014  | 3,320  | 2,432 | 1,618 | 1,314 | 1,192 | 1,104 | 1,022 | 0,649 | 0,556 | 0,511 | 0,438 | 0,3199    |
| 0,0200                  | 4,487  | 3,712  | 2,720 | 1,809 | 1,469 | 1,333 | 1,235 | 1,142 | 0,726 | 0,621 | 0,571 | 0,490 | 0,3998    |
| 0,0250                  | 5,017  | 4,150  | 3,041 | 2,022 | 1,642 | 1,490 | 1,380 | 1,277 | 0,812 | 0,695 | 0,640 | 0,547 | 0,4998    |
| 0,0320                  | 5,669  | 4,699  | 3,440 | 2,288 | 1,861 | 1,692 | 1,562 | 1,445 | 0,918 | 0,788 | 0,726 | 0,623 | 0,6397    |
| 0,0400                  | 6,323  | 5,265  | 3,846 | 2,565 | 2,092 | 1,908 | 1,758 | 1,627 | 1,035 | 0,890 | 0,819 | 0,704 | 0,7997    |
| 0,0500                  | 7,043  | 5,904  | 4,300 | 2,881 | 2,361 | 2,150 | 1,982 | 1,836 | 1,165 | 1,013 | 0,933 | 0,802 | 0,9996    |
| 0,0600                  | 7,679  | 6,498  | 4,705 | 3,171 | 2,607 | 2,367 | 2,188 | 2,028 | 1,299 | 1,129 | 1,042 | 0,898 | 1,1995    |
| 0,0700                  | 8,242  | 7,050  | 5,072 | 3,439 | 2,840 | 2,577 | 2,384 | 2,211 | 1,420 | 1,243 | 1,151 | 0,989 | 1,3994    |
| 0,0800                  | 8,749  | 7,581  | 5,407 | 3,693 | 3,055 | 2,768 | 2,558 | 2,379 | 1,541 | 1,352 | 1,249 | 1,076 | 1,5994    |
| 0,0900                  | 9,207  | 8,081  | 5,715 | 3,932 | 3,258 | 2,961 | 2,726 | 2,538 | 1,663 | 1,455 | 1,349 | 1,163 | 1,7993    |
| 0,1000                  | 9,630  | 8,526  | 6,000 | 4,158 | 3,456 | 3,132 | 2,880 | 2,694 | 1,776 | 1,554 | 1,440 | 1,242 | 1,9992    |
| 0,1250                  | 10,534 | 9,719  | 6,625 | 4,664 | 3,936 | 3,531 | 3,246 | 3,041 | 2,037 | 1,782 | 1,666 | 1,441 | 2,4990    |
| 0,1600                  | 11,502 | 11,179 | 7,331 | 5,249 | 4,413 | 4,002 | 3,673 | 3,445 | 2,346 | 2,060 | 1,932 | 1,686 | 3,1987    |
| 0,2000                  | 12,301 | 12,484 | 7,946 | 5,777 | 4,887 | 4,426 | 4,061 | 3,806 | 2,638 | 2,328 | 2,185 | 1,907 | 3,9984    |
| 0,2500                  | 12,946 | 13,617 | 8,500 | 6,282 | 5,338 | 4,845 | 4,437 | 4,157 | 2,933 | 2,593 | 2,431 | 2,125 | 4,9980    |
| 0,3200                  | 13,431 | 14,592 | 9,002 | 6,778 | 5,788 | 5,284 | 4,816 | 4,501 | 3,223 | 2,863 | 2,687 | 2,363 | 6,3974    |
| 0,4000                  | 13,664 | 15,169 | 9,346 | 7,122 | 6,131 | 5,608 | 5,112 | 4,776 | 3,477 | 3,094 | 2,907 | 2,551 | 7,9968    |
| 0,5000                  | 13,728 | 15,427 | 9,600 | 7,421 | 6,432 | 5,904 | 5,376 | 5,011 | 3,706 | 3,302 | 3,106 | 2,736 | 9,9960    |
| 0,6000                  | 13,495 | 15,199 | 9,626 | 7,537 | 6,565 | 6,045 | 5,487 | 5,111 | 3,821 | 3,417 | 3,220 | 2,859 | 11,995    |
| 0,7000                  | 13,214 | 14,833 | 9,582 | 7,570 | 6,621 | 6,104 | 5,529 | 5,155 | 3,890 | 3,478 | 3,287 | 2,913 | 13,994    |
| 0,8000                  | 12,894 | 14,376 | 9,495 | 7,568 | 6,637 | 6,143 | 5,555 | 5,175 | 3,931 | 3,532 | 3,333 | 2,962 | 15,994    |
| 0,9000                  | 12,589 | 13,912 | 9,381 | 7,524 | 6,632 | 6,154 | 5,554 | 5,169 | 3,968 | 3,565 | 3,368 | 3,002 | 17,993    |
| 1,0000                  | 12,275 | 13,440 | 9,250 | 7,483 | 6,605 | 6,133 | 5,541 | 5,152 | 3,978 | 3,580 | 3,286 | 3,025 | 19,992    |
| 1,2500                  | 11,526 | 12,343 | 8,886 | 7,287 | 6,487 | 6,043 | 5,447 | 5,056 | 3,972 | 3,581 | 3,386 | 3,030 | 24,990    |
| 1,6000                  | 10,587 | 11,097 | 8,363 | 6,983 | 6,239 | 5,829 | 5,252 | 4,850 | 3,889 | 3,521 | 3,328 | 2,985 | 31,987    |
| 2,0000                  | 9,664  | 10,085 | 7,800 | 6,607 | 5,936 | 5,569 | 4,992 | 4,625 | 3,744 | 3,416 | 3,229 | 2,909 | 39,984    |
| 2,5000                  | 8,704  | 9,121  | 7,176 | 6,164 | 5,576 | 5,238 | 4,686 | 4,349 | 3,574 | 3,251 | 3,086 | 2,799 | 49,980    |
| 3,2000                  | 7,661  | 8,092  | 6,443 | 5,605 | 5,103 | 4,800 | 4,304 | 3,982 | 3,325 | 3,041 | 2,886 | 2,622 | 63,974    |
| 4,0000                  | 6,747  | 7,186  | 5,767 | 5,069 | 4,642 | 4,371 | 3,939 | 3,633 | 3,074 | 2,814 | 2,682 | 2,439 | 79,968    |
| 5,0000                  | 5,885  | 6,309  | 5,100 | 4,519 | 4,162 | 3,927 | 3,539 | 3,274 | 2,805 | 2,560 | 2,453 | 2,239 | 99,960    |
| 6,0000                  | 5,233  | 5,626  | 4,574 | 4,080 | 3,764 | 3,568 | 3,220 | 2,978 | 2,552 | 2,356 | 2,255 | 2,072 | 119,95    |
| 7,0000                  | 4,704  | 5,082  | 4,148 | 3,717 | 3,435 | 3,265 | 2,954 | 2,734 | 2,365 | 2,174 | 2,087 | 1,921 | 139,94    |
| 8,0000                  | 4,279  | 4,632  | 3,797 | 3,417 | 3,163 | 3,007 | 2,734 | 2,525 | 2,195 | 2,024 | 1,944 | 1,792 | 159,94    |
| 9,0000                  | 3,932  | 4,255  | 3,502 | 3,162 | 2,931 | 2,791 | 2,539 | 2,350 | 2,049 | 1,891 | 1,817 | 1,681 | 179,93    |
| 10,0000                 | 3,634  | 3,933  | 3,250 | 2,948 | 2,730 | 2,603 | 2,369 | 2,200 | 1,918 | 1,778 | 1,713 | 1,583 | 199,92    |
| 11,0000                 | 3,378  | 3,660  | 3,033 | 2,760 | 2,560 | 2,441 | 2,223 | 2,071 | 1,807 | 1,680 | 1,622 | 1,495 | 219,91    |
| 12,0000                 | 3,159  | 3,420  | 2,843 | 2,593 | 2,408 | 2,300 | 2,095 | 1,956 | 1,709 | 1,592 | 1,535 | 1,416 | 239,90    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а. е. м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> | Вода   | $E$ , МэВ |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|---------------------------------|--------|-----------|
| 0,0125                  | 8,063  | 3,440  | 2,279  | 2,141  | 1,903  | 1,256 | 0,770 | 0,546 | 0,360 | 2,883  | 3,668                           | 2,799  | 0,2499    |
| 0,0160                  | 8,951  | 3,775  | 2,537  | 2,386  | 2,121  | 1,433 | 0,888 | 0,632 | 0,420 | 3,242  | 4,125                           | 3,116  | 0,3199    |
| 0,0200                  | 9,736  | 3,998  | 2,766  | 2,605  | 2,331  | 1,618 | 1,009 | 0,734 | 0,491 | 3,595  | 4,572                           | 3,397  | 0,3998    |
| 0,0250                  | 10,581 | 4,199  | 3,016  | 2,843  | 2,572  | 1,846 | 1,180 | 0,860 | 0,623 | 3,983  | 5,069                           | 3,703  | 0,4998    |
| 0,0320                  | 11,730 | 4,451  | 3,299  | 3,141  | 2,869  | 2,150 | 1,397 | 1,053 | 0,733 | 4,472  | 5,704                           | 4,094  | 0,6397    |
| 0,0400                  | 12,884 | 4,684  | 3,588  | 3,454  | 3,181  | 2,485 | 1,646 | 1,262 | 0,896 | 4,981  | 6,354                           | 4,500  | 0,7997    |
| 0,0500                  | 14,233 | 5,005  | 3,952  | 3,844  | 3,578  | 2,885 | 1,944 | 1,514 | 1,097 | 5,564  | 7,095                           | 4,997  | 0,9996    |
| 0,0600                  | 15,716 | 5,378  | 4,362  | 4,216  | 3,985  | 3,280 | 2,230 | 1,755 | 1,289 | 6,122  | 7,816                           | 5,496  | 1,1995    |
| 0,0700                  | 17,194 | 5,823  | 4,768  | 4,631  | 4,392  | 3,662 | 2,495 | 1,983 | 1,466 | 6,665  | 8,501                           | 6,026  | 1,3994    |
| 0,0800                  | 18,763 | 6,299  | 5,196  | 5,050  | 4,807  | 4,039 | 2,768 | 2,206 | 1,638 | 7,202  | 9,176                           | 6,575  | 1,5994    |
| 0,0900                  | 20,289 | 6,807  | 5,630  | 5,487  | 5,224  | 4,406 | 3,029 | 2,423 | 1,795 | 7,727  | 9,825                           | 7,133  | 1,7993    |
| 0,1000                  | 21,960 | 7,368  | 6,108  | 5,916  | 5,628  | 4,770 | 3,294 | 2,622 | 1,944 | 8,238  | 10,476                          | 7,698  | 1,9992    |
| 0,1250                  | 26,302 | 8,778  | 7,254  | 6,989  | 6,678  | 5,638 | 3,882 | 3,094 | 2,299 | 9,500  | 12,091                          | 9,136  | 2,4990    |
| 0,1600                  | 32,474 | 10,827 | 8,885  | 8,562  | 8,122  | 6,766 | 4,640 | 3,695 | 2,742 | 11,194 | 14,221                          | 11,216 | 3,1987    |
| 0,2000                  | 39,016 | 12,952 | 10,608 | 10,187 | 9,631  | 7,827 | 5,324 | 4,227 | 3,123 | 12,825 | 16,274                          | 13,390 | 3,9984    |
| 0,2500                  | 46,070 | 15,249 | 12,368 | 11,909 | 11,118 | 8,789 | 5,942 | 4,658 | 3,426 | 14,399 | 18,250                          | 15,708 | 4,9980    |
| 0,3200                  | 53,471 | 17,455 | 14,196 | 13,548 | 12,396 | 9,497 | 6,337 | 4,942 | 3,610 | 15,861 | 20,146                          | 17,986 | 6,3974    |
| 0,4000                  | 58,319 | 19,253 | 15,290 | 14,533 | 13,159 | 9,823 | 6,495 | 5,056 | 3,682 | 16,757 | 21,337                          | 19,402 | 7,9968    |
| 0,5000                  | 61,248 | 20,352 | 15,811 | 15,043 | 13,459 | 9,898 | 6,528 | 5,098 | 3,715 | 17,213 | 21,974                          | 20,179 | 9,9960    |
| 0,6000                  | 61,122 | 20,502 | 15,516 | 14,746 | 13,177 | 9,635 | 6,391 | 4,986 | 3,648 | 16,960 | 21,763                          | 19,896 | 11,995    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.с.м. | Li     | He     | N      | O      | Ne     | Ar    | Kr    | Xe    | Rn    | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|--------|-----------|
| 0,7000                | 58,833 | 20,218 | 14,871 | 14,133 | 12,648 | 9,237 | 6,180 | 4,810 | 3,555 | 16,433 | 21,119     | 19,097 | 13,994    |
| 0,8000                | 55,737 | 19,560 | 14,138 | 13,483 | 12,049 | 8,812 | 5,963 | 4,653 | 3,456 | 15,800 | 20,282     | 18,174 | 15,994    |
| 0,9000                | 52,534 | 18,725 | 13,415 | 13,786 | 11,370 | 8,387 | 5,722 | 4,522 | 3,358 | 15,151 | 19,428     | 17,205 | 17,993    |
| 1,0000                | 49,858 | 18,028 | 12,867 | 12,210 | 10,878 | 8,057 | 5,550 | 4,422 | 3,284 | 14,550 | 18,639     | 16,391 | 19,992    |
| 1,2500                | 44,165 | 16,538 | 11,774 | 11,241 | 9,988  | 7,491 | 5,261 | 4,240 | 3,208 | 13,303 | 16,893     | 14,902 | 24,990    |
| 1,6000                | 37,799 | 14,802 | 10,687 | 10,219 | 9,149  | 6,983 | 5,009 | 4,073 | 3,153 | 11,917 | 14,911     | 13,280 | 31,987    |
| 2,0000                | 32,292 | 13,237 | 9,812  | 9,344  | 8,455  | 6,568 | 4,797 | 3,939 | 3,097 | 10,764 | 13,260     | 11,895 | 39,984    |
| 2,5000                | 27,125 | 11,661 | 8,905  | 8,475  | 7,822  | 6,186 | 4,593 | 3,825 | 3,043 | 9,659  | 11,690     | 10,549 | 49,980    |
| 3,2000                | 22,550 | 10,019 | 7,944  | 7,583  | 7,042  | 5,702 | 4,336 | 3,608 | 2,893 | 8,524  | 10,160     | 9,245  | 63,970    |
| 4,0000                | 19,031 | 8,604  | 7,036  | 6,747  | 6,344  | 5,190 | 3,979 | 3,351 | 2,710 | 7,532  | 8,875      | 8,114  | 79,968    |
| 5,0000                | 16,218 | 7,369  | 6,166  | 5,936  | 5,595  | 4,636 | 3,606 | 3,045 | 2,499 | 6,599  | 7,726      | 7,079  | 99,960    |
| 6,0000                | 14,225 | 6,468  | 5,498  | 5,287  | 5,008  | 4,181 | 3,266 | 2,776 | 2,287 | 5,873  | 6,856      | 6,280  | 119,95    |
| 7,0000                | 12,736 | 5,783  | 4,970  | 4,791  | 4,530  | 3,808 | 2,995 | 2,555 | 2,112 | 5,306  | 6,177      | 5,675  | 139,94    |
| 8,0000                | 11,543 | 5,221  | 4,537  | 4,378  | 4,135  | 3,489 | 2,745 | 2,354 | 1,955 | 4,837  | 5,620      | 5,175  | 159,94    |
| 9,0000                | 10,540 | 4,790  | 4,171  | 4,027  | 3,810  | 3,222 | 2,539 | 2,182 | 1,821 | 4,440  | 5,151      | 4,752  | 179,93    |
| 10,0000               | 9,718  | 4,436  | 3,871  | 3,738  | 3,536  | 2,990 | 2,363 | 2,031 | 1,700 | 4,108  | 4,758      | 4,401  | 199,92    |
| 11,0000               | 9,007  | 4,130  | 3,612  | 3,488  | 3,300  | 2,790 | 2,211 | 1,901 | 1,592 | 3,824  | 4,425      | 4,100  | 219,91    |
| 12,0000               | 8,387  | 3,864  | 3,386  | 3,270  | 3,093  | 2,616 | 2,078 | 1,788 | 1,498 | 3,577  | 4,131      | 3,838  | 239,90    |

#### 42.2. МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

В результате взаимодействия с атомным электроном заряженная частица, движущаяся в веществе, изменяет направление своего движения. В единичном акте взаимодействия угол отклонения, как правило, очень мал, но статистическое сложение углов отклонения при большом числе столкновений с атомными электронами приводит к тому, что параллельный пучок частиц пройдя некоторую толщ вещества, становится расходящимся пучком. Угловое распределение в пучке, т. е. зависимость потока от угла отклонения относительно первоначальной оси пучка, хорошо описывается распределением Гаусса

$$F = F_0 \exp \left( -\theta^2 / \theta_0^2 \right),$$

где  $F$  — поток под углом  $\theta$ ;  $F_0$  — поток под углом  $0^\circ$  относительно оси пучка;  $\theta_0$  — угол, под которым поток падает в е раз. Угол  $\theta$  называют углом многократного рассеяния, и в качестве характеристики размытия пучка пользуются углом  $\theta_0$ .

В современном виде теория многократного рассеяния изложена в работах [4, 5]. Параметрам теории являются величины

$$\chi_c = 0,1569 \frac{Z(Z+1)z^2t}{A(pv)^2};$$

$$b = \ln \left[ 2730 (Z+1)Z^{1/3} z^2 t / (A^2) \right] - 0,1544.$$

В этих выражениях  $z$  и  $Z$  — атомные номера падающей частицы и рассеивателя;  $A$  — атомная масса рассеивателя;  $t$  — толщина рассеивателя, г/см<sup>2</sup>;  $pv$  — произведение импульса на скорость падающей частицы;  $\beta = v/c$  ( $c$  — скорость света);  $(pv)^2 = (E^2 + 2EMc^2)\beta$  и  $\beta^2 = 1 - (1 + E/Mc^2)^{-2}$ ;  $E$  и  $Mc^2$  — энергия и масса покоя падающей частицы, МэВ.

Для определения угла многократного рассеяния  $\theta_0$ , соответствующего спаду потока в е раз, нужно:

- 1) вычислить  $\chi_c$  и  $b$ ;
- 2) по вычисленному значению  $b$  найти из графика на рис. 42.1 значение параметра  $\chi$ ;
- 3) вычислить  $\theta = \chi \chi_c$ , рад.

Т а б л и ц а 42.20. Пробег  $R$ , мг/см<sup>2</sup>, ионов неона  $^{20}_{10}\text{Ne}^+$  в различных веществах [1]

$E_m$  — энергия на единицу массы падающей частицы;  $E$  — полная энергия

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.с.м. | Be    | C     | Al    | Ti    | Ni    | Ge    | Zr    | Ag    | Eu    | Ta    | Au    | U     | $E$ , МэВ |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 0,0125                | 0,079 | 0,087 | 0,121 | 0,181 | 0,212 | 0,253 | 0,279 | 0,312 | 0,483 | 0,573 | 0,626 | 0,753 | 0,2499    |
| 0,0160                | 0,096 | 0,107 | 0,147 | 0,220 | 0,257 | 0,305 | 0,335 | 0,373 | 0,577 | 0,683 | 0,745 | 0,894 | 0,3199    |
| 0,0200                | 0,114 | 0,127 | 0,175 | 0,260 | 0,306 | 0,360 | 0,394 | 0,437 | 0,676 | 0,798 | 0,871 | 1,041 | 0,3998    |
| 0,0250                | 0,133 | 0,151 | 0,207 | 0,307 | 0,362 | 0,423 | 0,462 | 0,511 | 0,790 | 0,930 | 1,014 | 1,210 | 0,4998    |
| 0,0320                | 0,158 | 0,181 | 0,247 | 0,367 | 0,434 | 0,503 | 0,549 | 0,604 | 0,935 | 1,100 | 1,198 | 1,424 | 0,6397    |
| 0,0400                | 0,184 | 0,211 | 0,289 | 0,428 | 0,509 | 0,586 | 0,638 | 0,701 | 1,085 | 1,274 | 1,387 | 1,645 | 0,7997    |
| 0,0500                | 0,213 | 0,246 | 0,336 | 0,498 | 0,593 | 0,679 | 0,739 | 0,811 | 1,255 | 1,470 | 1,600 | 1,893 | 0,9996    |
| 0,0600                | 0,240 | 0,277 | 0,379 | 0,562 | 0,670 | 0,764 | 0,831 | 0,910 | 1,409 | 1,647 | 1,791 | 2,116 | 1,1995    |
| 0,0700                | 0,265 | 0,306 | 0,418 | 0,620 | 0,740 | 0,842 | 0,915 | 1,001 | 1,550 | 1,808 | 1,965 | 2,319 | 1,3994    |
| 0,0800                | 0,288 | 0,333 | 0,456 | 0,675 | 0,806 | 0,915 | 0,994 | 1,085 | 1,680 | 1,957 | 2,125 | 2,505 | 1,5994    |
| 0,0900                | 0,310 | 0,358 | 0,491 | 0,726 | 0,867 | 0,983 | 1,067 | 1,164 | 1,801 | 2,095 | 2,274 | 2,678 | 1,7993    |
| 0,1000                | 0,331 | 0,382 | 0,525 | 0,775 | 0,925 | 1,047 | 1,137 | 1,239 | 1,914 | 2,224 | 2,414 | 2,840 | 1,9992    |
| 0,1250                | 0,381 | 0,437 | 0,604 | 0,888 | 1,059 | 1,195 | 1,297 | 1,410 | 2,171 | 2,517 | 2,729 | 3,204 | 2,4990    |
| 0,1600                | 0,444 | 0,504 | 0,704 | 1,029 | 1,225 | 1,378 | 1,497 | 1,623 | 2,482 | 2,876 | 3,111 | 3,645 | 3,1987    |
| 0,2000                | 0,511 | 0,571 | 0,808 | 1,174 | 1,395 | 1,566 | 1,701 | 1,841 | 2,802 | 3,236 | 3,495 | 4,084 | 3,9984    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | Be     | C      | Al     | Ti     | Ni     | Ge     | Zr     | Ag     | Eu     | Ta      | Au      | U       | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------|
| 0,2500                | 0,591  | 0,648  | 0,930  | 1,340  | 1,588  | 1,781  | 1,935  | 2,090  | 3,158  | 3,638   | 3,924   | 4,575   | 4,9980    |
| 0,3200                | 0,696  | 0,747  | 1,089  | 1,553  | 1,839  | 2,057  | 2,237  | 2,413  | 3,612  | 4,151   | 4,470   | 5,198   | 6,3974    |
| 0,4000                | 0,814  | 0,854  | 1,263  | 1,783  | 2,107  | 2,351  | 2,558  | 2,757  | 4,089  | 4,687   | 5,041   | 5,849   | 7,9968    |
| 0,5000                | 0,960  | 0,985  | 1,474  | 2,058  | 2,425  | 2,698  | 2,939  | 3,165  | 4,645  | 5,312   | 5,706   | 6,605   | 9,9960    |
| 0,6000                | 1,107  | 1,115  | 1,682  | 2,325  | 2,733  | 3,032  | 3,307  | 3,560  | 5,176  | 5,907   | 6,338   | 7,319   | 11,995    |
| 0,7000                | 1,256  | 1,248  | 1,890  | 2,590  | 3,036  | 3,361  | 3,670  | 3,949  | 5,694  | 6,486   | 6,952   | 8,011   | 13,994    |
| 0,8000                | 1,410  | 1,385  | 2,100  | 2,854  | 3,337  | 3,687  | 4,031  | 4,336  | 6,205  | 7,056   | 7,556   | 9,692   | 15,994    |
| 0,9000                | 1,566  | 1,526  | 2,311  | 3,119  | 3,639  | 4,012  | 4,390  | 4,723  | 6,711  | 7,620   | 8,152   | 9,362   | 17,993    |
| 1,0000                | 1,727  | 1,673  | 2,526  | 3,385  | 3,941  | 4,338  | 4,751  | 5,110  | 7,214  | 8,179   | 8,744   | 10,255  | 19,992    |
| 1,2500                | 2,147  | 2,061  | 3,077  | 4,062  | 4,704  | 5,158  | 5,660  | 6,089  | 8,471  | 9,574   | 10,220  | 11,675  | 24,990    |
| 1,6000                | 2,781  | 2,658  | 3,889  | 5,042  | 5,804  | 6,337  | 6,968  | 7,502  | 10,251 | 11,544  | 12,304  | 14,001  | 31,987    |
| 2,0000                | 3,572  | 3,415  | 4,879  | 6,220  | 7,118  | 7,741  | 8,530  | 9,190  | 12,347 | 13,850  | 14,743  | 16,714  | 39,984    |
| 2,5000                | 4,662  | 4,458  | 6,216  | 7,787  | 8,857  | 9,593  | 10,598 | 11,420 | 15,081 | 16,851  | 17,911  | 20,218  | 49,980    |
| 3,2000                | 6,379  | 6,089  | 8,277  | 10,171 | 11,483 | 12,387 | 13,718 | 14,787 | 19,145 | 21,306  | 22,604  | 25,389  | 63,974    |
| 4,0000                | 8,607  | 8,190  | 10,905 | 13,176 | 14,774 | 15,883 | 17,608 | 18,998 | 24,154 | 26,780  | 28,360  | 31,720  | 79,968    |
| 5,0000                | 11,786 | 11,165 | 14,599 | 17,361 | 19,330 | 20,717 | 22,971 | 24,805 | 30,973 | 34,240  | 36,166  | 40,287  | 99,960    |
| 6,0000                | 15,395 | 14,526 | 18,744 | 22,024 | 24,389 | 26,066 | 28,902 | 31,216 | 38,456 | 42,391  | 44,678  | 49,580  | 119,95    |
| 7,0000                | 19,429 | 18,270 | 23,340 | 27,164 | 29,955 | 31,930 | 35,391 | 38,231 | 46,602 | 51,235  | 53,904  | 59,612  | 139,94    |
| 8,0000                | 23,890 | 22,395 | 28,382 | 32,779 | 36,026 | 38,317 | 42,433 | 45,848 | 55,386 | 60,775  | 63,838  | 70,397  | 159,94    |
| 9,0000                | 28,768 | 26,902 | 33,869 | 38,865 | 42,598 | 45,223 | 50,028 | 54,062 | 64,822 | 71,002  | 74,482  | 81,923  | 179,93    |
| 10,0000               | 34,060 | 31,793 | 39,799 | 45,418 | 49,670 | 52,645 | 58,185 | 62,860 | 74,915 | 81,913  | 85,820  | 94,188  | 199,92    |
| 11,0000               | 39,770 | 37,066 | 46,171 | 52,432 | 57,237 | 60,580 | 66,901 | 72,230 | 85,660 | 93,487  | 97,819  | 107,191 | 219,91    |
| 12,0000               | 45,893 | 42,719 | 52,984 | 59,909 | 65,294 | 69,021 | 76,169 | 82,167 | 97,042 | 105,717 | 110,492 | 120,938 | 239,90    |

| $E_m$ ,<br>МэВ/а.е.м. | H      | He     | N      | O      | Ne     | Ar     | Kr     | Xe     | Rn      | Майлар | $(CH_2)_n$ | Вода   | $E$ , МэВ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|------------|--------|-----------|
| 0,0125                | 0,028  | 0,074  | 0,104  | 0,110  | 0,122  | 0,189  | 0,320  | 0,471  | 0,735   | 0,084  | 0,066      | 0,081  | 0,2499    |
| 0,0160                | 0,035  | 0,091  | 0,129  | 0,136  | 0,151  | 0,231  | 0,387  | 0,566  | 0,879   | 0,104  | 0,082      | 0,101  | 0,3199    |
| 0,0200                | 0,043  | 0,109  | 0,155  | 0,164  | 0,182  | 0,276  | 0,458  | 0,664  | 1,024   | 0,125  | 0,098      | 0,122  | 0,3998    |
| 0,0250                | 0,051  | 0,132  | 0,186  | 0,197  | 0,218  | 0,327  | 0,538  | 0,774  | 1,181   | 0,149  | 0,117      | 0,147  | 0,4998    |
| 0,0320                | 0,063  | 0,162  | 0,227  | 0,240  | 0,265  | 0,391  | 0,636  | 0,906  | 1,366   | 0,180  | 0,141      | 0,180  | 0,6397    |
| 0,0400                | 0,075  | 0,195  | 0,271  | 0,285  | 0,314  | 0,465  | 0,733  | 1,034  | 1,547   | 0,212  | 0,167      | 0,215  | 0,7997    |
| 0,0500                | 0,089  | 0,235  | 0,321  | 0,337  | 0,371  | 0,527  | 0,839  | 1,170  | 1,737   | 0,248  | 0,195      | 0,255  | 0,9996    |
| 0,0600                | 0,102  | 0,272  | 0,368  | 0,385  | 0,421  | 0,589  | 0,930  | 1,288  | 1,897   | 0,281  | 0,221      | 0,292  | 1,1995    |
| 0,0700                | 0,113  | 0,307  | 0,410  | 0,429  | 0,467  | 0,645  | 1,012  | 1,391  | 2,038   | 0,312  | 0,245      | 0,326  | 1,3994    |
| 0,0800                | 0,124  | 0,339  | 0,449  | 0,469  | 0,510  | 0,696  | 1,086  | 1,484  | 2,163   | 0,340  | 0,267      | 0,357  | 1,5994    |
| 0,0900                | 0,134  | 0,369  | 0,485  | 0,506  | 0,549  | 0,742  | 1,154  | 1,569  | 2,277   | 0,366  | 0,288      | 0,385  | 1,7993    |
| 0,1000                | 0,144  | 0,397  | 0,519  | 0,541  | 0,585  | 0,786  | 1,216  | 1,648  | 2,384   | 0,392  | 0,308      | 0,412  | 1,9992    |
| 0,1250                | 0,164  | 0,459  | 0,594  | 0,618  | 0,666  | 0,882  | 1,355  | 1,823  | 2,620   | 0,448  | 0,352      | 0,471  | 2,4990    |
| 0,1600                | 0,188  | 0,530  | 0,681  | 0,709  | 0,761  | 0,995  | 1,520  | 2,030  | 2,898   | 0,516  | 0,405      | 0,540  | 3,1987    |
| 0,2000                | 0,211  | 0,598  | 0,763  | 0,794  | 0,851  | 1,105  | 1,680  | 2,232  | 3,171   | 0,582  | 0,458      | 0,605  | 3,9984    |
| 0,2500                | 0,234  | 0,669  | 0,850  | 0,885  | 0,948  | 1,225  | 1,858  | 2,457  | 3,476   | 0,656  | 0,516      | 0,674  | 4,9980    |
| 0,3200                | 0,262  | 0,754  | 0,955  | 0,994  | 1,067  | 1,378  | 2,085  | 2,747  | 3,873   | 0,748  | 0,589      | 0,757  | 6,3974    |
| 0,4000                | 0,291  | 0,841  | 1,064  | 1,108  | 1,192  | 1,543  | 2,334  | 3,067  | 4,311   | 0,846  | 0,666      | 0,843  | 7,9968    |
| 0,5000                | 0,324  | 0,942  | 1,192  | 1,243  | 1,342  | 1,746  | 2,641  | 3,460  | 4,850   | 0,964  | 0,758      | 0,944  | 9,9960    |
| 0,6000                | 0,357  | 1,040  | 1,320  | 1,377  | 1,492  | 1,950  | 2,950  | 3,856  | 5,393   | 1,080  | 0,849      | 1,043  | 11,995    |
| 0,7000                | 0,390  | 1,138  | 1,451  | 1,516  | 1,647  | 2,162  | 3,268  | 4,264  | 5,948   | 1,200  | 0,942      | 1,146  | 13,994    |
| 0,8000                | 0,425  | 1,239  | 1,589  | 1,661  | 1,808  | 2,384  | 3,597  | 4,687  | 6,518   | 1,324  | 1,039      | 1,253  | 15,994    |
| 0,9000                | 0,462  | 1,343  | 1,734  | 1,813  | 1,979  | 2,616  | 3,939  | 5,123  | 7,105   | 1,453  | 1,140      | 1,366  | 17,993    |
| 1,0000                | 0,501  | 1,452  | 1,886  | 1,973  | 2,159  | 2,859  | 4,294  | 5,570  | 7,707   | 1,588  | 1,245      | 1,485  | 19,992    |
| 1,2500                | 0,608  | 1,741  | 2,292  | 2,399  | 2,638  | 3,502  | 5,219  | 6,723  | 9,246   | 1,947  | 1,526      | 1,805  | 24,990    |
| 1,6000                | 0,779  | 2,189  | 2,916  | 3,052  | 3,370  | 4,470  | 6,582  | 8,405  | 11,446  | 2,503  | 1,967      | 2,302  | 31,987    |
| 2,0000                | 1,008  | 2,760  | 3,697  | 3,871  | 4,280  | 5,651  | 8,213  | 10,401 | 14,005  | 3,209  | 2,536      | 2,939  | 39,984    |
| 2,5000                | 1,346  | 3,566  | 4,768  | 4,995  | 5,510  | 7,220  | 10,344 | 12,977 | 17,262  | 4,191  | 3,340      | 3,832  | 49,980    |
| 2,2000                | 1,913  | 4,863  | 6,434  | 6,743  | 7,398  | 9,579  | 13,482 | 16,748 | 21,982  | 5,735  | 4,626      | 5,251  | 63,974    |
| 4,0000                | 2,686  | 6,588  | 8,577  | 8,983  | 9,795  | 12,523 | 17,338 | 21,353 | 27,699  | 7,735  | 6,313      | 7,101  | 79,968    |
| 5,0000                | 3,827  | 9,105  | 11,618 | 12,148 | 13,157 | 16,606 | 22,624 | 27,622 | 35,392  | 10,576 | 8,732      | 9,744  | 99,960    |
| 6,0000                | 5,145  | 12,005 | 15,057 | 15,722 | 16,940 | 21,154 | 28,459 | 34,508 | 43,766  | 13,792 | 11,484     | 12,746 | 119,95    |
| 7,0000                | 6,633  | 15,279 | 18,887 | 19,699 | 21,142 | 26,171 | 34,858 | 42,022 | 52,873  | 17,378 | 14,560     | 16,101 | 139,94    |
| 8,0000                | 8,283  | 18,921 | 23,101 | 24,068 | 25,766 | 31,660 | 41,837 | 50,180 | 62,721  | 21,329 | 17,956     | 19,793 | 159,94    |
| 9,0000                | 10,098 | 22,922 | 27,701 | 28,834 | 30,807 | 37,628 | 49,416 | 59,009 | 73,324  | 25,646 | 21,675     | 23,828 | 179,93    |
| 10,0000               | 12,074 | 27,262 | 32,680 | 33,990 | 36,258 | 44,074 | 57,584 | 68,513 | 84,695  | 30,330 | 25,717     | 28,203 | 199,92    |
| 11,0000               | 14,213 | 31,935 | 38,030 | 39,531 | 42,114 | 51,000 | 66,337 | 78,691 | 96,855  | 35,378 | 30,077     | 32,913 | 219,91    |
| 12,0000               | 16,514 | 36,942 | 43,750 | 45,455 | 48,375 | 58,405 | 75,668 | 89,539 | 109,805 | 40,786 | 34,755     | 37,955 | 239,90    |



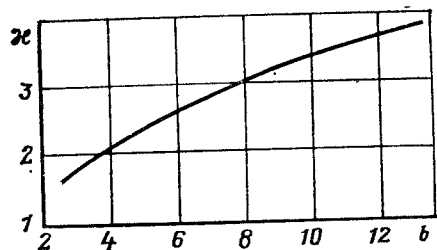
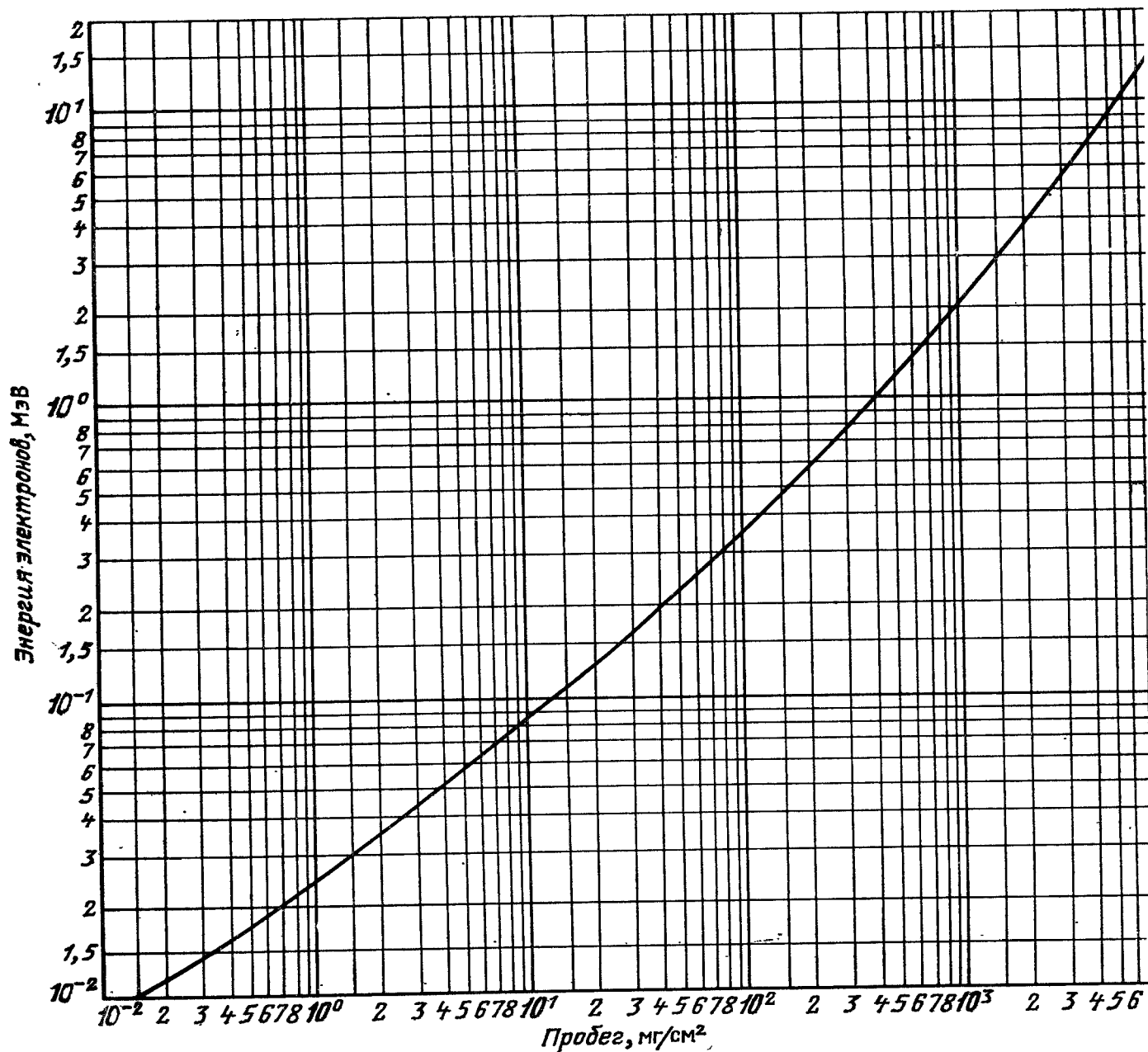


Рис. 42.1. Связь между параметрами  $x$  и  $b$ , используемым при расчете угла многократного рассеяния

Рис. 42.2. Пробег электронов в алюминии





## 42.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Электроны, проходя через вещество, теряют энергию, главным образом, на ионизацию, возбуждение атомов вещества и на тормозное излучение. В каждом акте взаимодействия с атомными электронами для падающего электрона велика вероятность потерять существенную долю своей энергии и выбыть из пучка вследствие рассеяния на большой угол. Поэтому для электронов нет понятия среднего пробега в веществе, а говорят лишь о максимальной глубине проникновения (или экстраполированном пробеге). Достаточно точной теории, позволяющей получить формулу потерь энергии для электронов, нет.

Для оценки глубины проникновения моноэнергетического пучка электронов пользуются эмпирическими формулами. Например, для пробега  $R$  (мг/см<sup>2</sup>) электронов в алюминии в [6] рекомендована формула

$$R = 412 [E]^n, \quad 0,01 \leq E \leq 3 \text{ МэВ},$$

где  $n = 1,265 - 0,0954 \ln E$  (МэВ);  $R = 530 E - 106$  мг/см<sup>2</sup>;  $3 \leq E \leq 20$  МэВ.

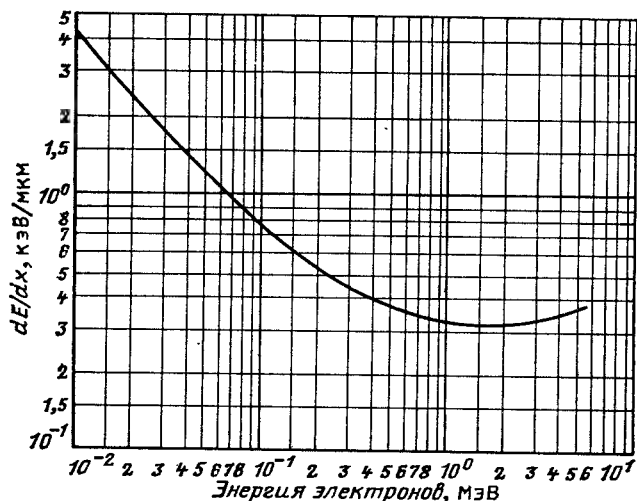


Рис. 42.3. Удельные потери энергии электронов в кремнии

Построенный на основе этих формул график приведен на рис. 42.2. Поскольку экстраполированный пробег, мг/см<sup>2</sup>, слабо зависит от вещества, этим графиком можно пользоваться для оценки пробегов электронов и в других веществах, вводя поправку с помощью соотношения

$$R_x = R_{Al} \frac{(Z/A)_{Al}}{(Z/A)_x},$$

где  $R$  и  $Z/A$  — пробег и отношение заряда к массе для  $Al$  и элемента  $x$ .

На рис. 42.3 приведен график [7] удельных потерь энергии электронов для кремния — материала, широко используемого для изготовления детекторов излучений. Из этого же графика можно получить удельные потери энергии электронов в других веществах. Для этого значение потерь, полученное из графика, следует умножить на отношение плотности данного вещества к плотности кремния (2,33 г/см<sup>3</sup>).

Электроны, родившиеся при  $\beta$ -распаде радионуклидов, обладают сплошным энергетическим спектром с максимальной энергией  $E_{max}$ . При прохождении через вещество пучок  $\beta$ -частиц ослабляется приблизительно по экспоненциальному закону:

$$F = F_0 \exp(-\mu_m x),$$

где  $x$  — толщина поглотителя, г/см<sup>2</sup>;  $\mu_m$  — массовый коэффициент поглощения электронов, см<sup>2</sup>/г, приблизительно представляемый в виде  $\mu_m = 15,5 E^{-1,41}$  см<sup>2</sup>/г [8].

## 42.4. ПРОХОЖДЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

При прохождении  $\gamma$ -излучения через вещество наиболее интенсивно протекают три процесса: фотоэффект, комптон-эффект и рождение электронно-позитронных пар. Каждый из этих процессов приводит к удалению фотона из пучка. Поэтому ослабление узкого пучка моноэнергетических фотонов описывается экспонентой

$$F = F_0 \exp(-\mu_m x),$$

где  $x$  — толщина вещества, г/см<sup>2</sup>;  $\mu_m$  — массовый коэффициент ослабления, см<sup>2</sup>/г.

Массовые коэффициенты ослабления для различных веществ приведены на рис. 42.4 [9], а зависимости толщины защиты из различных материалов от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения — в табл. 42.21—42.24.

Таблица 42.21. Толщина защиты из свинца, мм, в зависимости от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения (широкий пучок) [8]

| Кратность ослабления | Энергия $\gamma$ -излучения, МэВ |      |      |      |     |      |      |      |      |     |      |     |     |     |     |      |
|----------------------|----------------------------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
|                      | 0,1                              | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5 | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0 | 1,5  | 2   | 3   | 4   | 6   | 10   |
| 2                    | 1                                | 2    | 3    | 4    | 5   | 7    | 8    | 10   | 11,5 | 13  | 17   | 20  | 21  | 20  | 16  | 13,5 |
| 5                    | 2                                | 4    | 6    | 9    | 11  | 15   | 19   | 22   | 25   | 28  | 38   | 43  | 46  | 45  | 38  | 30   |
| 10                   | 3                                | 5,5  | 9    | 13   | 16  | 21   | 26   | 30,5 | 35   | 38  | 51   | 59  | 65  | 64  | 55  | 42   |
| 30                   | 3,5                              | 7    | 11,5 | 17   | 23  | 30   | 36,5 | 43   | 49,5 | 55  | 73   | 85  | 93  | 92  | 80  | 63   |
| 100                  | 5                                | 10   | 16   | 23   | 30  | 38,5 | 47   | 55   | 63   | 70  | 96,5 | 113 | 122 | 121 | 109 | 87   |
| 500                  | 6,5                              | 14   | 22   | 31   | 40  | 51   | 61   | 72   | 82   | 92  | 129  | 150 | 163 | 161 | 149 | 119  |
| 10 <sup>3</sup>      | 7                                | 15   | 24   | 33   | 44  | 57   | 69,5 | 81   | 92   | 102 | 141  | 165 | 160 | 178 | 165 | 133  |
| 5 · 10 <sup>3</sup>  | 9                                | 19   | 30   | 42   | 55  | 70   | 85   | 99   | 112  | 124 | 170  | 198 | 219 | 217 | 203 | 166  |
| 10 <sup>4</sup>      | 10,5                             | 21   | 33   | 45,5 | 59  | 75   | 91   | 106  | 120  | 133 | 183  | 213 | 236 | 234 | 220 | 180  |
| 5 · 10 <sup>4</sup>  | 11,5                             | 23,5 | 37   | 52   | 69  | 87   | 105  | 123  | 140  | 156 | 214  | 247 | 263 | 272 | 258 | 215  |
| 10 <sup>5</sup>      | 11,5                             | 24   | 38   | 54   | 72  | 92   | 111  | 130  | 148  | 165 | 227  | 262 | 289 | 289 | 275 | 229  |

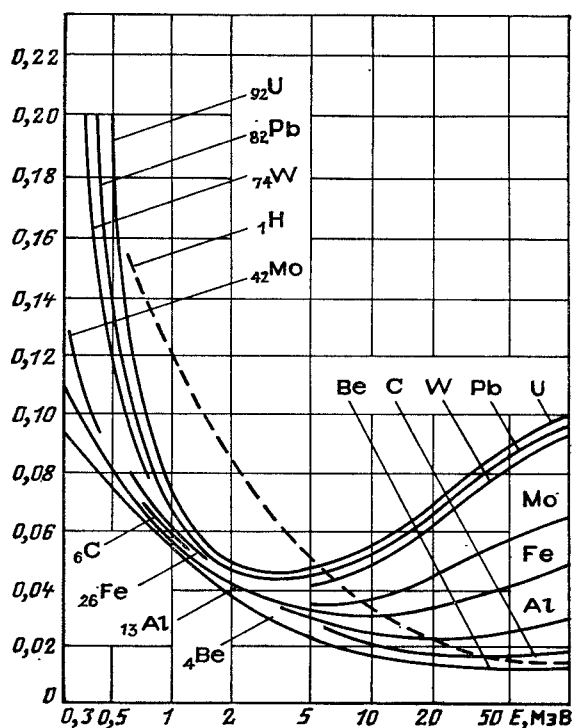
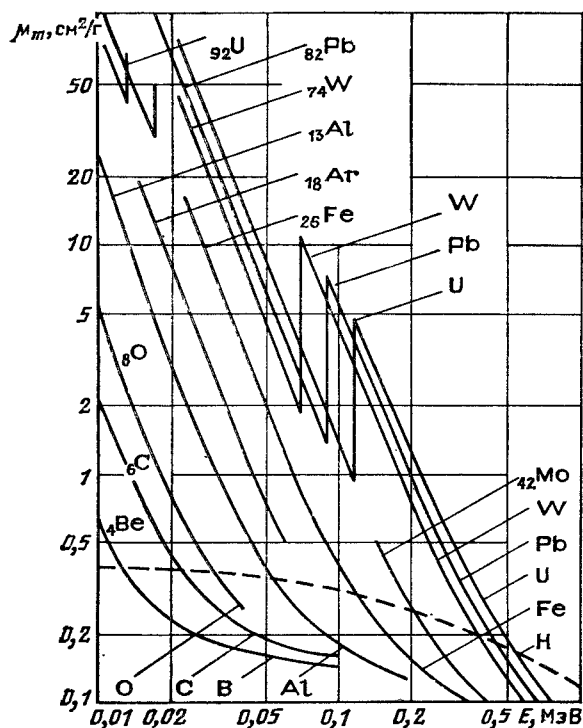


Рис. 42.4. Массовый коэффициент ослабления узкого пучка  $\gamma$ -излучения в различных веществах в зависимости от энергии  $\gamma$ -излучения

Таблица 42.22. Зависимость толщины защиты из железа от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения (широкий пучок) [8]

| Кратность<br>ослаб-<br>ления | Толщина защиты, см, при $E_{\gamma}$ , МэВ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|--------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                              | 0,1                                        | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,5  | 2,0  | 3,0  | 4    | 6    | 10   |
| 2                            | 0,7                                        | 1,2  | 1,7  | 2,2  | 2,5  | 2,7  | 2,9  | 3,1  | 3,2  | 3,3  | 3,6  | 3,9  | 4,4  | 4,5  | 4,6  | 3,4  |
| 5                            | 1,4                                        | 2,5  | 3,4  | 4,1  | 4,8  | 5,1  | 5,5  | 5,7  | 6,1  | 6,4  | 7,4  | 8,1  | 8,9  | 9,4  | 9,6  | 8,0  |
| 10                           | 1,9                                        | 3,5  | 4,6  | 5,6  | 6,3  | 6,8  | 7,3  | 7,7  | 8,1  | 8,5  | 10,0 | 11,0 | 12,2 | 12,6 | 13,2 | 11,4 |
| 30                           | 2,4                                        | 4,5  | 6,2  | 7,9  | 8,5  | 9,2  | 9,8  | 10,4 | 10,9 | 11,4 | 13,6 | 15,1 | 17,0 | 17,7 | 18,8 | 17,0 |
| 100                          | 3,4                                        | 6,1  | 8,1  | 9,6  | 10,8 | 11,7 | 12,5 | 13,2 | 13,9 | 14,5 | 17,3 | 19,5 | 22,1 | 23,3 | 25,0 | 23,1 |
| 500                          | 4,4                                        | 7,7  | 10,1 | 12,0 | 13,7 | 14,9 | 16,0 | 17,0 | 17,9 | 18,7 | 22,3 | 25,0 | 28,8 | 30,6 | 32,7 | 31,2 |
| $10^3$                       | 4,5                                        | 8,2  | 11,0 | 13,2 | 15,0 | 16,3 | 17,5 | 18,6 | 19,6 | 20,5 | 24,4 | 27,5 | 31,7 | 33,7 | 36,0 | 34,6 |
| $5 \cdot 10^3$               | 5,6                                        | 10,1 | 13,4 | 15,8 | 17,7 | 19,3 | 20,7 | 22,0 | 23,2 | 24,3 | 29,4 | 33,3 | 38,2 | 40,7 | 43,2 | 42,2 |
| $10^4$                       | 6,8                                        | 11,5 | 14,2 | 17,1 | 19,0 | 20,7 | 22,3 | 23,6 | 24,9 | 26,0 | 31,3 | 35,5 | 40,9 | 43,7 | 46,5 | 45,2 |
| $5 \cdot 10^4$               | 8,6                                        | 13,8 | 17,0 | 19,6 | 21,8 | 23,6 | 25,2 | 26,9 | 29,4 | 29,9 | 35,9 | 40,8 | 47,2 | 50,4 | 55,0 | 53,0 |
| $10^5$                       | 10,0                                       | 15,8 | 18,2 | 20,8 | 23,0 | 24,9 | 26,7 | 28,4 | 30,0 | 31,5 | 38,0 | 43,2 | 50,0 | 53,4 | 58,3 | 56,1 |
| $10^6$                       | 12,8                                       | 17,9 | 21,4 | 24,2 | 26,7 | 28,9 | 31,2 | 33,3 | 35,2 | 37,0 | 44,7 | 50,6 | 58,8 | 63,3 | 69,0 | 67,0 |
| $10^7$                       | 15,0                                       | 20,3 | 24,3 | 27,6 | 30,5 | 33,2 | 35,8 | 38,1 | 40,2 | 42,4 | 51,3 | 57,9 | 67,5 | 73,1 | 79,4 | 78,0 |

Таблица 42.23. Зависимость толщины защиты из бетона от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения (широкий пучок) [8]

| Кратность<br>ослаб-<br>ления | Толщина защиты, см, при $E_\gamma$ , МэВ |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 0,1                                      | 0,2  | 0,3  | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1,0   | 1,5   | 2     | 3     | 4     | 6     | 10    |
| 2                            | 4,7                                      | 7,6  | 9,9  | 11,3  | 12,3  | 12,4  | 12,4  | 12,6  | 12,7  | 12,9  | 13,6  | 14,1  | 15,3  | 16,4  | 18,8  | 18,8  |
| 5                            | 5,6                                      | 11,0 | 15,5 | 18,8  | 21,1  | 21,8  | 22,3  | 22,6  | 23,0  | 23,5  | 25,8  | 28,2  | 32,9  | 35,2  | 38,7  | 39,9  |
| 10                           | 8,2                                      | 14,6 | 19,7 | 23,7  | 25,8  | 26,8  | 27,6  | 28,4  | 29,1  | 29,9  | 34,0  | 37,6  | 43,4  | 47,5  | 51,6  | 54,0  |
| 30                           | 8,5                                      | 16,4 | 22,8 | 27,7  | 32,9  | 34,8  | 36,4  | 37,8  | 39,2  | 40,5  | 46,5  | 51,6  | 59,9  | 65,7  | 71,6  | 78,1  |
| 100                          | 11,5                                     | 21,1 | 48,9 | 35,2  | 39,9  | 43,0  | 45,3  | 47,2  | 48,8  | 50,5  | 58,3  | 65,7  | 77,5  | 84,5  | 95,1  | 105,1 |
| 500                          | 13,8                                     | 24,6 | 35,2 | 43,9  | 50,5  | 54,5  | 57,3  | 58,8  | 62,5  | 64,6  | 74,8  | 84,5  | 101,0 | 110,4 | 124,4 | 139,7 |
| $10^3$                       | 15,5                                     | 28,2 | 39,2 | 48,1  | 55,2  | 59,2  | 62,5  | 65,3  | 76,8  | 70,4  | 81,7  | 92,7  | 110,9 | 120,9 | 137,9 | 155,0 |
| $5 \cdot 10^3$               | 18,8                                     | 33,1 | 45,6 | 56,4  | 65,7  | 70,0  | 74,0  | 77,0  | 80,2  | 82,8  | 97,4  | 110,9 | 132,7 | 146,8 | 166,7 | 186,7 |
| $10^4$                       | 21,8                                     | 35,2 | 48,5 | 60,3  | 69,3  | 74,7  | 79,1  | 82,9  | 85,2  | 89,2  | 104,5 | 118,6 | 143,2 | 156,7 | 179,0 | 201,3 |
| $5 \cdot 10^4$               | 23,3                                     | 42,3 | 56,4 | 68,6  | 78,1  | 83,4  | 88,7  | 93,4  | 97,9  | 102,1 | 120,4 | 136,2 | 164,9 | 181,6 | 206,6 | 233,6 |
| $10^5$                       | 30,5                                     | 50,5 | 64,6 | 75,1  | 82,8  | 83,3  | 93,5  | 98,1  | 102,5 | 106,8 | 126,6 | 144,4 | 173,8 | 191,4 | 218,4 | 248,9 |
| $10^6$                       | 49,3                                     | 66,4 | 79,8 | 89,9  | 97,4  | 103,7 | 109,2 | 114,1 | 119,5 | 124,4 | 149,8 | 171,4 | 205,4 | 225,4 | 260,6 | 295,8 |
| $10^7$                       | 64,0                                     | 84,9 | 15,7 | 130,7 | 110,3 | 117,4 | 123,6 | 130,0 | 136,2 | 142,0 | 170,8 | 194,9 | 236,0 | 259,4 | 299,4 | 340,5 |

Таблица 42.24. Зависимость толщины защиты из воды от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения (широкий пучок) [8]

| Кратность<br>ослабления | Толщина защиты, см, при $E_\gamma$ , МэВ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                         | 0,1                                      | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 2   | 3   | 4   | 6   | 10  |
| 2                       | 18                                       | 27  | 30  | 30  | 29  | 28  | 27  | 27  | 26  | 26  | 28  | 33  | 37  | 38  | 40  | 45  |
| 5                       | 27                                       | 37  | 42  | 44  | 46  | 46  | 47  | 47  | 48  | 48  | 53  | 59  | 69  | 74  | 85  | 98  |
| 10                      | 35                                       | 47  | 52  | 55  | 57  | 58  | 60  | 61  | 62  | 63  | 71  | 79  | 92  | 101 | 116 | 135 |
| 30                      | 45                                       | 58  | 65  | 69  | 73  | 75  | 77  | 79  | 81  | 82  | 96  | 107 | 124 | 140 | 163 | 192 |
| 100                     | 53                                       | 70  | 79  | 84  | 88  | 92  | 95  | 98  | 101 | 104 | 120 | 136 | 160 | 182 | 212 | 253 |
| 500                     | 66                                       | 85  | 96  | 104 | 110 | 116 | 120 | 124 | 128 | 132 | 153 | 173 | 206 | 234 | 277 | 334 |
| $10^3$                  | 72                                       | 92  | 104 | 113 | 118 | 124 | 129 | 134 | 138 | 143 | 167 | 189 | 226 | 257 | 306 | 368 |
| $5 \cdot 10^3$          | 81                                       | 105 | 120 | 130 | 138 | 147 | 154 | 160 | 165 | 170 | 198 | 225 | 271 | 309 | 368 | 446 |
| $10^4$                  | 91                                       | 114 | 128 | 139 | 147 | 155 | 162 | 168 | 175 | 181 | 212 | 241 | 290 | 331 | 396 | 480 |
| $5 \cdot 10^4$          | 103                                      | 128 | 144 | 156 | 167 | 175 | 183 | 190 | 196 | 205 | 241 | 276 | 334 | 383 | 460 | 554 |
| $10^5$                  | 110                                      | 135 | 152 | 164 | 175 | 184 | 192 | 201 | 204 | 216 | 255 | 292 | 353 | 404 | 487 | 587 |
| $10^6$                  | 128                                      | 156 | 176 | 192 | 205 | 215 | 224 | 233 | 243 | 253 | 299 | 342 | 415 | 479 | 571 | 695 |
| $10^7$                  | 150                                      | 178 | 200 | 217 | 232 | 243 | 255 | 265 | 277 | 288 | 344 | 393 | 478 | 554 | 657 | 807 |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Northcliffe L. C., Schilling R. F.//Nuclear Data Tables. 1970. Vol. A7. P. 233—273.
2. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975.
3. Пучеров Н. Н., Романовский С. В., Чесиокова Т. Д. Таблицы массовой тормозной способности и пробегов заряженных частиц с энергией 1—100 МэВ. Киев: Наукова думка, 1976.
4. Nigam B. P., Sandersan M. K., Wu T.-W.//Phys. Rev. 1959. Voll. 115. P. 491—498.

5. Marion I. B., Zimmerman B. A.//Nucl. Instrum. and Methods. 1967. Vol. 51. P. 93—97.
6. Katz L., Penfold A. S.//Rev. Mod. Phys. 1952. Vol. 24. P. 28—35.
7. Marion I. B., Young F. C. Nuclear Reaction Analysis: Graphs and Tables. Amsterdam: North Holland Publishing Co., 1968.
8. Аглинцев К. К., Кодюков В. М. Прикладная дозиметрия. М.: Госатомиздат, 1962.
9. Прайс В., Хортон К., Спинни К. Защита от ядерных излучений. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.

# ГЛАВА 43 КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

В. С. Птускин

## 43.1. ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Космические лучи (КЛ) — элементарные частицы и атомные ядра высоких энергий космического происхождения. К космическим лучам также относят частицы, рожденные в атмосфере Земли первичными КЛ в результате взаимодействий с ядрами атомов воздуха. Наблюдаются КЛ с энергиями на одну частицу от  $10^6$  до  $10^{20}$  эВ.

Основная доля падающих на границу атмосферы КЛ имеет галактическое происхождение (галактические КЛ). Источниками этих частиц являются сверхновые и их остатки (включая нейтронные звезды) [1, 2]. Часть КЛ (в основном с энергиями  $10^6$ — $10^9$  эВ) приходит к Земле от Солнца. Солнечные КЛ ускоряются во время сильных хромосферных вспышек и других активных процессов на Солнце [3]. Частицы самых высоких наблюдаемых энергий ( $E > 10^{17}$ — $10^{19}$  эВ), возможно, имеют негалактическое происхождение. Они ускоряются в активных галактиках [2]. Источником электронов с энергиями  $E < 3 \cdot 10^7$  эВ в межпланетной среде является магнитосфера Юпитера [4]. При энергиях  $10^6$ — $10^8$  эВ обнаружена так называемая аномальная ядерная компонента КЛ. Эти частицы ускоряются во внешних областях гелиосферы — на внешних границах области, занятой солнечным ветром [5].

Единицей интегральной плотности потока КЛ  $I$  служит  $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ . Энергия частицы  $E$  измеряется в электрон-вольтах, для ядер используют также величину  $\epsilon = E/A$ , эВ/нуклон, — энергию на нуклон ( $A$  — атомный номер ядра). Жесткость заряженной частицы с импульсом  $p$ , кг·м/с, и зарядом  $Ze$ , Кл, равна  $R = pc/Ze$ ; обычно  $R$  измеряют в вольтах. Импульс частицы, эВ/с ( $c$  — скорость света), численно равен жесткости в вольтах, если частица однозарядна, т. е.  $Z=1$ . Ниже приведены общие сведения о КЛ [6]:

|                                                                                                                |                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Плотность потока КЛ вне области влияния магнитного поля Земли, $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ . . . . .   | $(3 \div 6) \cdot 10^3$ |
| Концентрация первичных КЛ в межзвездном пространстве, $\text{м}^{-3}$ . . . . .                                | $10^{-4}$               |
| Плотность энергии первичных КЛ в межзвездном пространстве, Дж/м <sup>3</sup> . . . . .                         | $1,6 \cdot 10^{-13}$    |
| Плотность пар ионов, образующихся КЛ на уровне моря (в среднем), $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$ . . . . . | $1,6 \cdot 10^6$        |
| Общая мощность КЛ, достигающих поверхности Земли, Вт . . . . .                                                 | $4 \cdot 10^8$          |

## 43.2. ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Приведем параметры галактической модели происхождения КЛ [2]:

|                                                                                                                                     |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Полная мощность галактических источников КЛ, Вт . . . . .                                                                           | $3 \cdot 10^{33}$ |
| Высота галактического гало КЛ (область захвата КЛ в Галактике), кпк ( $1 \text{ кпк} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ м}$ ) . . . . . | 1—10              |
| Время удержания КЛ в Галактике, лет . . . . .                                                                                       | $10^7$ — $10^8$   |
| Средняя толща вещества, проходимая КЛ в Галактике, кг/м <sup>2</sup> . . . . .                                                      | 50—100            |

Плотность потока КЛ в зависимости от энергии частиц показана на рис. 43.1—43.4. Характерна степенная зависимость  $I(E)$ . Наблюдаемый у Земли энергетический спектр КЛ в области малых энергий меняется в зависимости от уровня солнечной активности (см. § 43.3).

Первые наблюдения антипротонов в составе КЛ [12—14] показали, что плотность потока антипротонов составляет по отношению к плотности потока протонов  $(6,8 \pm 1,7) \cdot 10^{-4}$  при  $4,4 \leq E \leq 13,4$  ГэВ [13] и  $(0,6 \pm 1,4) \cdot 10^{-4}$  при  $0,2 \leq E \leq 2,0$  ГэВ [14], что возмож-

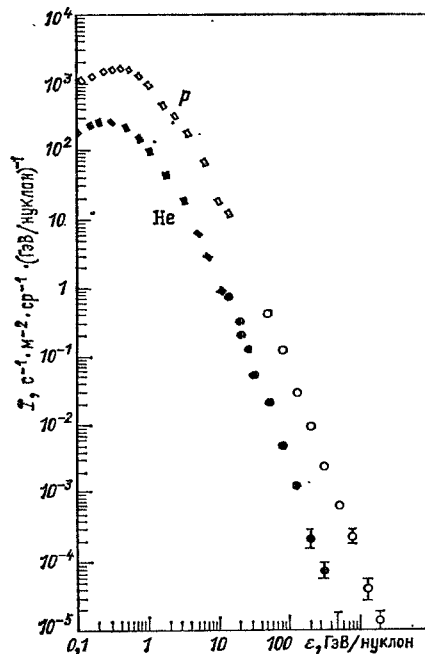


Рис 43.1. Спектры протонов и ядер He в КЛ [7]

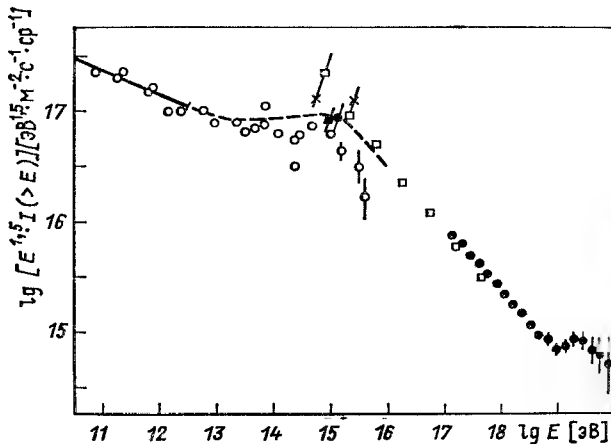


Рис. 43.2. Спектр КЛ высоких энергий [8]

но в 2—3 раза превышает ожидаемую плотность потока вторичных антипротонов, рождающихся при взаимодействии КЛ с ядрами межзвездного газа. Абсолютная плотность потока антипротонов на границе атмосферы равна  $(3,8 \pm 0,95) \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{ГэВ}^{-1}$  при  $4,7 \leq E \leq 11,3$  ГэВ [13].

Детальная информация о составе ядер в КЛ получена лишь для энергий частиц до 10 ГэВ/нуклон [15].

Плотность потока различных ядер в составе КЛ с энергиями 600—1000 МэВ/нуклон на границе атмосферы по измерениям, выполненным в сентябре 1977 г. [16], составляет:

| Элемент | $I, \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ | Элемент | $I, \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ |
|---------|-------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------|
| He      | 54,08 (1,10)                                                | Si      | 0,202 (4)                                                   |
| C       | 1,52 (3)                                                    | S       | 0,0467 (19)                                                 |
| N       | 0,42 (1)                                                    | Ar      | 0,0205 (12)                                                 |
| O       | 1,41 (3)                                                    | Ca      | 0,0323 (15)                                                 |
| Ne      | 0,228 (5)                                                   | Cr      | 0,0240 (15)                                                 |
| Na      | 0,51 (2)                                                    | Fe      | 0,142 (4)                                                   |
| Mg      | 0,282 (6)                                                   | Ni      | 0,0074 (9)                                                  |
| Al      | 0,056 (2)                                                   |         |                                                             |

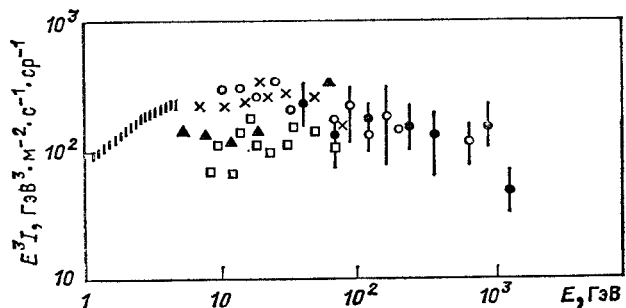


Рис. 43.3. Энергетический спектр электронной компоненты КЛ [9, 10]

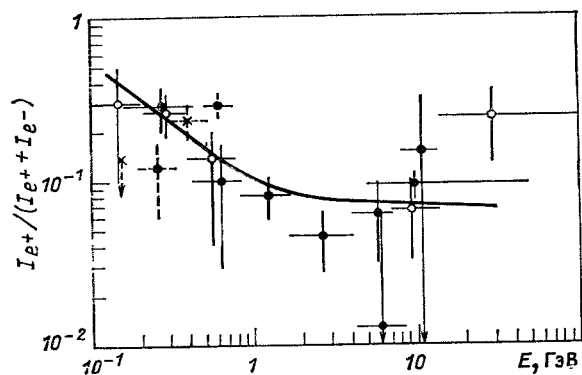


Рис. 43.4. Относительная плотность потока релятивистских позитронов в КЛ [11]. Эти позитроны вторичны, т. е. возникают в основном при распадах  $\pi^+$ -мезонов, рождающихся при взаимодействии протонно-ядерной компоненты КЛ с атомными ядрами межзвездного газа

Высокое содержание в составе КЛ ядер Li, Be, B, элементов с зарядом ядра  $21 \leq Z \leq 25$  и других редких в природе элементов и их изотопов (рис. 43.5, 43.6) объясняется тем, что они вторичны — возникают при фрагментации более тяжелых ядер, взаимодействующих с атомными ядрами межзвездного газа. Доля вторичных ядер уменьшается с энергией (рис. 43.7), что связано с соответствующим уменьшением времени удержания КЛ в Галактике. Определенный с учетом поправки на фрагментацию состав первичных ядер КЛ в источниках приведен в табл. 43.1.

Таблица 43.1. Относительный состав первичных КЛ в галактических [20] и солнечных [21] источниках КЛ. Концентрация ядер кремния условно принята за 100 единиц

| Элемент | Источники галактических КЛ | Солнечные КЛ  |
|---------|----------------------------|---------------|
| H       | 77 000 (9000)              | —             |
| He      | 11 500 (1000)              | 41 600 (2000) |
| C       | 465 (40)                   | 270 (51)      |
| N       | 20 (10)                    | 80 (22)       |
| O       | 525 (50)                   | 625 (76)      |
| Ne      | 62 (5)                     | 83 (23)       |
| Na      | 9 (3)                      | 8,7 (3,2)     |
| Mg      | 110 (7)                    | 124 (25)      |
| Al      | 14 (3)                     | 9,4 (3,8)     |
| Si      | 100                        | 100           |
| S       | 14 (3)                     | 23 (12)       |
| Ar      | 4 (2)                      | 4,1 (2)       |
| Ca      | 7 (2)                      | 7,9 (39)      |
| Fe      | 92 (12)                    | 106 (39)      |
| Ni      | 4,8 (0,6)                  | 5,2 (2,6)     |

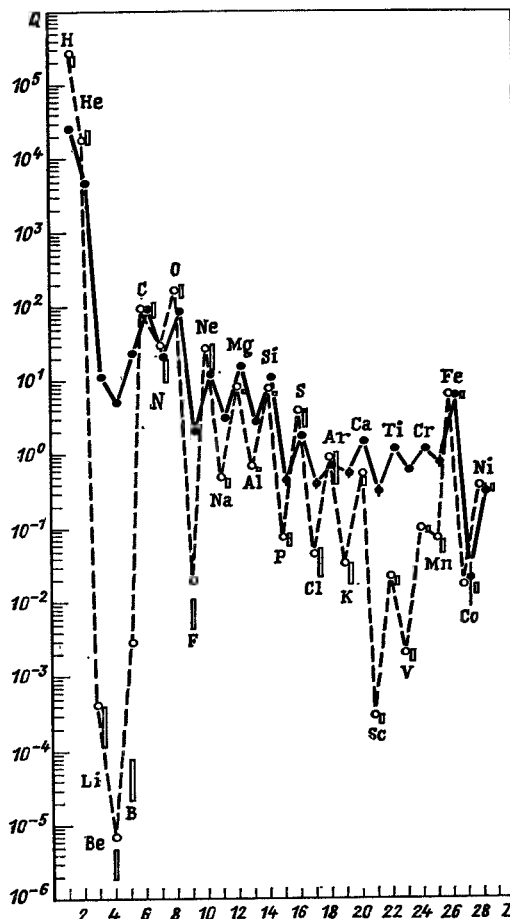


Рис. 43.5. Относительное содержание  $Q$  элементов от H до Ni; концентрация ядер C принята за 100 единиц: темные кружки — наблюдаемые у Земли КЛ с энергиями 70—280 МэВ/нуклон, светлые кружки — Солнечная система (в среднем); прямоугольники — локальная окрестность Галактики [17]

Для определения возраста КЛ в Галактике используется радиоактивный нуклид  $^{10}\text{Be}$ . Доля нераспавшегося нуклида  $^{10}\text{Be}$  составляет в КЛ  $0,14 \pm 0,07$  при энергии частиц  $\varepsilon \approx 200$  МэВ/нуклон [22].

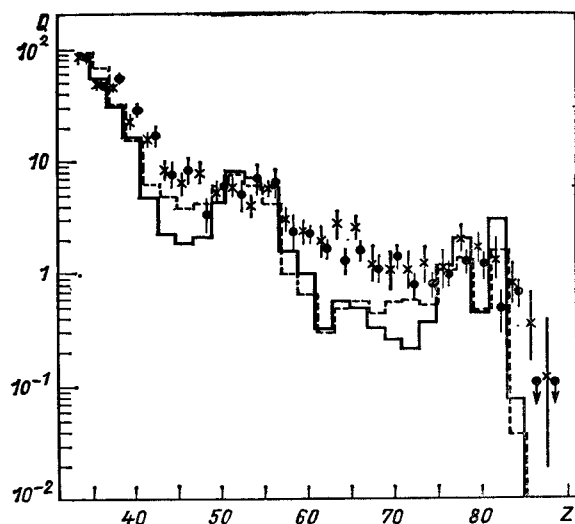


Рис. 43.6. Относительное содержание  $Q$  элементов с зарядом ядра  $Z \geq 30$ , нормированное на  $10^6$  (концентрация железа):

кружки и крестки — в составе КЛ; сплошная линия — в Солнечной системе; пунктир — ожидаемое содержание в том случае, если бы состав КЛ в источниках совпадал со средним составом вещества в Солнечной системе и средняя толщина проходного в межзвездной среде вещества составляла  $55 \text{ кг/м}^2$  [18]

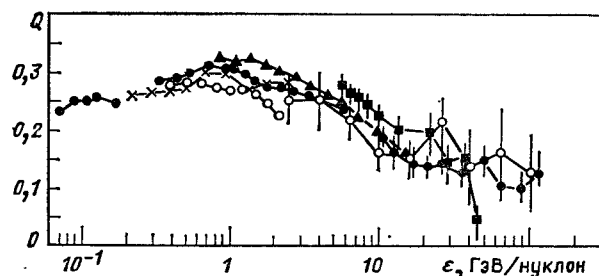


Рис. 43.7. Отношение потоков ядер В и С как функция энергии [19]

Отклонение углового распределения потока галактических КЛ от изотропного иллюстрирует рис. 43.8.

### 43.3. МОДУЛЯЦИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Наличие в межпланетном пространстве регулярных и случайных магнитных полей солнечного происхождения приводит к модуляции КЛ — пространственным и временным изменениям их интенсивности [24—26] (класс IIIa в табл. 43.2; рис. 43.9, 43.10, а, б).

Измерения на космических аппаратах до расстояний от Солнца более 30 а.е. ( $1 \text{ а.е.} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$ ) обнаруживают в плоскости эклиптики радиальный градиент интенсивности галактических КЛ в межпланетной среде с типичными значениями  $3 \cdot 10^{-2} (\text{а.е.})^{-1}$  в период мак-

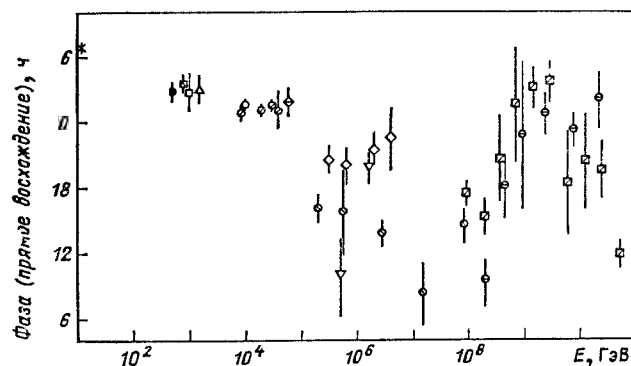
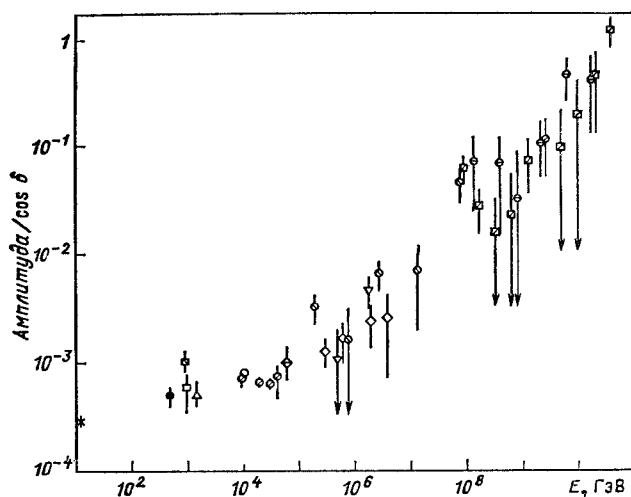


Рис. 43.8. Анизотропия КЛ, определенная с помощью гармонического анализа скорости счета детекторов КЛ по звездному времени. Приведены амплитуда и фаза первой гармоники ( $\delta$  — географическая широта, на которой проводились соответствующие наблюдения) [23]

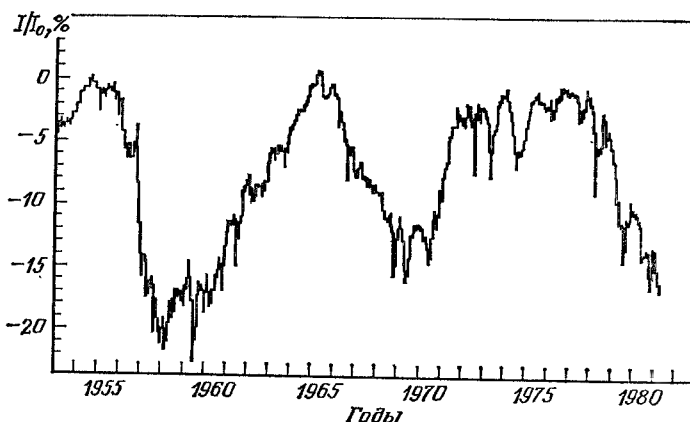


Рис. 43.9. Вариации относительной плотности потока ядерной компоненты галактических КЛ по усредненным за 27 дней показаниям нейтронного монитора станции Клаймакс (географическая широта  $39,37^\circ$ , долгота  $253,82^\circ$ ). Средняя энергия первичных КЛ за пределами атмосферы примерно равна 6 ГэВ/нуклон. За нулевой уровень выбрана плотность потока в период минимума солнечной активности (1954 г.) [27]

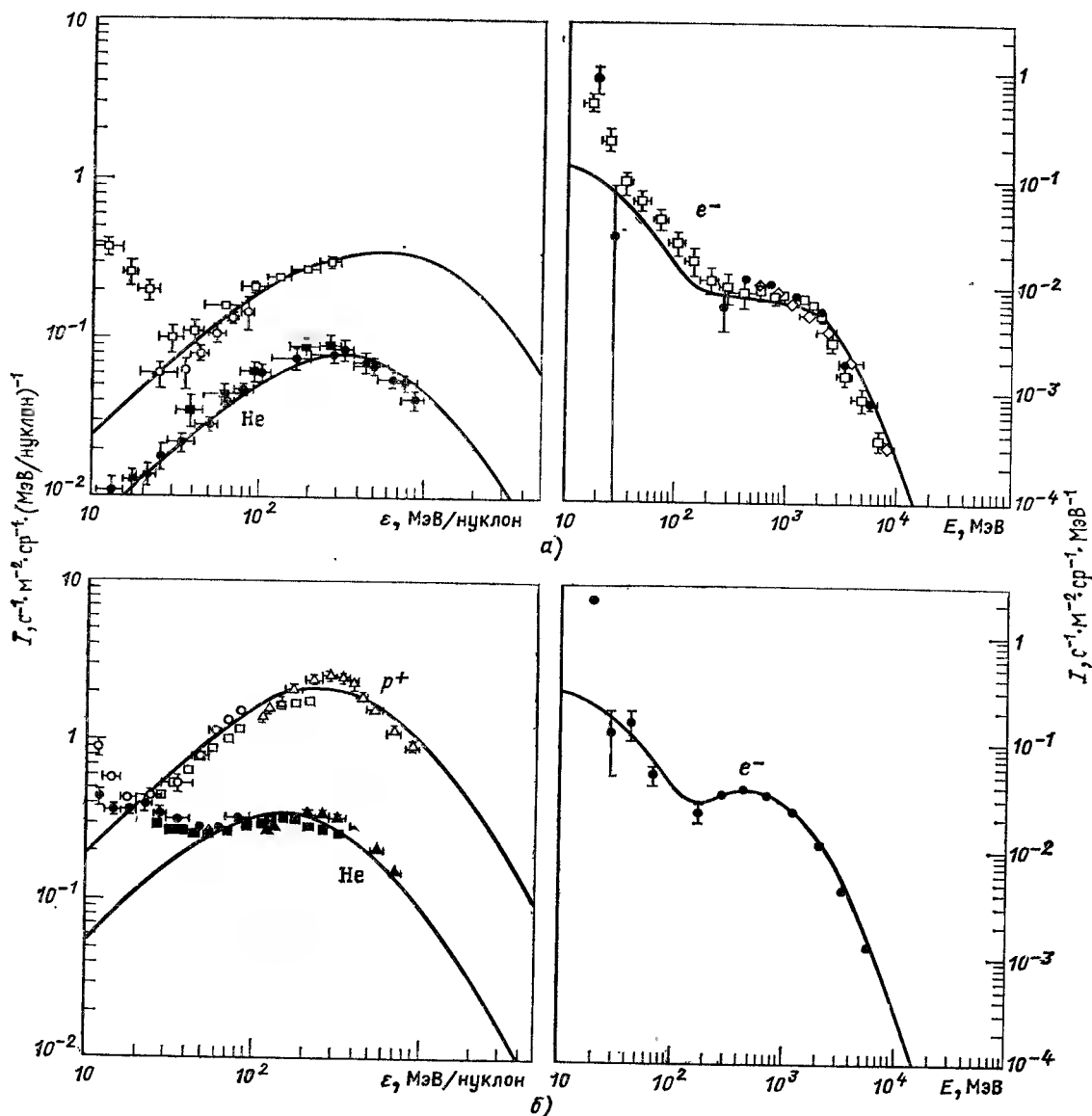


Рис. 43.10. Энергетические спектры КЛ в периоды максимума (а) — 1969 г. и минимума (б) — 1977 г. солнечной активности [28]

симула солнечной активности и  $1,5 \cdot 10^{-2}$  (а.е.) $^{-1}$  в минимуме солнечной активности (для  $\epsilon \approx 1$  ГэВ/нуклон) [27]. Понижение интенсивности КЛ во внутренних областях Солнечной системы обусловлено взаимодействием КЛ с неоднородностями магнитного поля, движущимися от Солнца вместе с солнечным ветром (поток плазмы из атмосферы Солнца). Эффективный размер области модуляции галактических КЛ в межпланетной среде оценивается в 50—100 а.е. (в плоскости эклиптики).

#### 43.4. СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Основную долю солнечных КЛ составляют протоны. Для мощных солнечных вспышек отношение потоков протонов и ядер гелия примерно равно 50 при энергиях десятки мегаэлектрон-вольт на нуклон. Суммарная энергия ускоренных во вспышке частиц достигает

$10^{25}$  Дж. Зарядовый состав ускоренных частиц, их полная энергия и вид энергетического спектра существенно изменяются от вспышки к вспышке. Дифференциальный спектр частиц по модулю импульса имеет степенной (с типичным показателем степени 3—7) или экспоненциальный вид. На орбите Земли поток солнечных КЛ обычно достигает максимального значения через 8—16 ч после начала вспышки и заметно уменьшается через 30—32 ч (см. подробнее [3, 26, 30]).

Вспышки КЛ, сопровождающиеся испусканием протонов с энергиями более 500 МэВ и дающие эффект на уровне земной поверхности, были зарегистрированы в течение 1942—1984 гг. примерно 40 раз. Эти вспышки происходят, как правило, в периоды изменения солнечной активности, но не в моменты ее максимума. Протонные вспышки с энергиями частиц  $10 < E < 100$  МэВ регистрируются в верхних слоях атмосферы значительно чаще. Протонные вспышки на Солнце сопровождаются

Таблица 43.2. Классификация временных вариаций плотности потока КЛ [24]

| Класс вариаций КЛ                                             | Тип вариаций КЛ                                                                                                                          | $\delta I/I, \%$                      |                         |                                                            | Природа вариаций                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                               |                                                                                                                                          | Мезонная компонента                   | Нейтронная компонента   | В стратосфере и за границей атмосферы                      |                                                                                                                                                                                                  |
| I. Метеорологические                                          | Сезонные                                                                                                                                 | 5                                     | 1                       | —                                                          | Изменение поглощения и распада вторичных частиц в земной атмосфере в связи с изменением метеорологических условий (температуры, давления) над пунктом наблюдения. Флуктуации атмосферных условий |
|                                                               | Суточные (маскируют аналогичные вариации III класса)                                                                                     | 0,1—0,2%/К                            | —                       | —                                                          |                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | Температурный эффект                                                                                                                     | 0,1—0,2%/К                            | 0,02%/К                 | —                                                          |                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | Барометрический эффект                                                                                                                   | $(1 \div 3) \times 10^{-3} \%/Па$     | $7 \cdot 10^{-3} \%/Па$ | —                                                          |                                                                                                                                                                                                  |
| II. Изменение геомагнитного порога обреза-ния КЛ              | Возрастание в период главной фазы магнитной бури на фоне основного понижения                                                             | 3                                     | 10                      | Непосредственное наблюдение изменения геомагнитного порога | Влияние вариаций токовых систем и магнитосферы на траектории КЛ и изменение геомагнитного порога обреза-ния КЛ                                                                                   |
|                                                               | Солнечно-суточные (локальный источник)                                                                                                   | 1                                     | 3                       |                                                            |                                                                                                                                                                                                  |
| IIIa. Модуляционные эффекты, связанные с деятельностью Солнца | 11-летние                                                                                                                                | }                                     | 6                       | 100                                                        | Рассеяние галактических КЛ на неоднородностях магнитного поля солнечного ветра. Изменения активности Солнца. Инверсия общего магнитного поля Солнца                                              |
|                                                               | 22-летние [29]                                                                                                                           |                                       |                         |                                                            |                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | 27-дневные                                                                                                                               | 0,5                                   | 1—2                     | 10                                                         | Асимметрия в потоке неоднородностей солнечного ветра и секторная структура межпланетного магнитного поля                                                                                         |
|                                                               | Со спорадическим периодом 7—35 суток                                                                                                     | 0,5                                   | 1—2                     | 10                                                         |                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | Солнечно-суточные                                                                                                                        | 0,2—0,3                               | 0,5                     | 2                                                          | Анизотропия, вызываемая воздействием на КЛ электромагнитных полей в межпланетной среде                                                                                                           |
|                                                               | Эффект Форбуша (понижение во время магнитной бури)                                                                                       | 10                                    | 30                      | 50                                                         |                                                                                                                                                                                                  |
| IIIб. Генерация быстрых частиц на Солнце                      | Возрастание перед эффектом Форбуша                                                                                                       | 1                                     | 2                       | —                                                          | Взаимодействие КЛ с ударными волнами в межпланетной среде                                                                                                                                        |
|                                                               | Большие возрастания интенсивности КЛ, связанные с мощными хромосферными вспышками на Солнце (значения приводятся для события 23.02.1956) | 400                                   | 5000                    | В тысячи раз выше нормального уровня                       | Увеличение энергии КЛ, отражающихся от переднего фронта движущейся к Земле ударной волны                                                                                                         |
|                                                               | Малые возрастания, связанные с обычными хромосферными вспышками                                                                          | 0,1—0,2                               | 1                       |                                                            |                                                                                                                                                                                                  |
| IIIв. Анизотропия и вариации интенсивности галактических КЛ   | Возможные аномальные длительные возрастания потока КЛ (характерные времена $10^4$ — $10^6$ лет)                                          | $10^3$ — $10^4$                       |                         | —                                                          | Ускорение частиц в области солнечной вспышки с последующим распространением от Солнца                                                                                                            |
|                                                               | Звездно-суточная вариация                                                                                                                | 0,1 (в минимуме солнечной активности) | —                       | —                                                          |                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               |                                                                                                                                          |                                       |                         |                                                            | Вспышки сверхновых на расстоянии примерно 20 пк от Солнца                                                                                                                                        |
|                                                               |                                                                                                                                          |                                       |                         |                                                            | Диффузия КЛ из Галактики, пекулярное движение Солнечной системы, потоки КЛ от отдельных близких галактических источников                                                                         |



испусканием быстрых электронов ( $E > 30$  кэВ, плотностью потока до  $10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ ).

Средняя по времени мощность КЛ от Солнца составляет  $10^{17}$  Вт.

Связанные с генерацией быстрых частиц на Солнце вариации интенсивности КЛ у поверхности Земли указаны в табл. 43.2 (см. класс III б).

### 43.5. ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Действие земного магнитного поля приводит к изменению первоначальных траекторий КЛ [31]. В результате возникает эффект геомагнитного обрезания КЛ: для каждой геомагнитной широты Земли с данного направления могут приходить частицы с жесткостью  $R$ , превышающей пороговое значение (табл. 43.3). Значение жесткости  $R$ , В, определяет траекторию заряженной частицы в магнитном поле. Радиус, м, кругового движения заряженной частицы в однородном магнитном поле  $B$ , Тл, составляет  $r = 3,34 \cdot 10^{-9} R/B$ .

Вариации интенсивности КЛ геомагнитной природы указаны в классе II табл. 43.2.

### 43.6. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Слой атмосферного воздуха для падающих из космоса быстрых частиц эквивалентен примерно 13 ядерным пробегам и 27 радиационным длинам, поэтому первичные КЛ достаточно высокой энергии вызывают разветвленную цепь взаимодействий. Возникающие при этом  $\pi^\pm$ -мезоны и частично  $K$ -мезоны при распаде порождают мюоны и нейтрино — так называемую проникающую компоненту вторичных КЛ. (Мюоны при энергиях менее

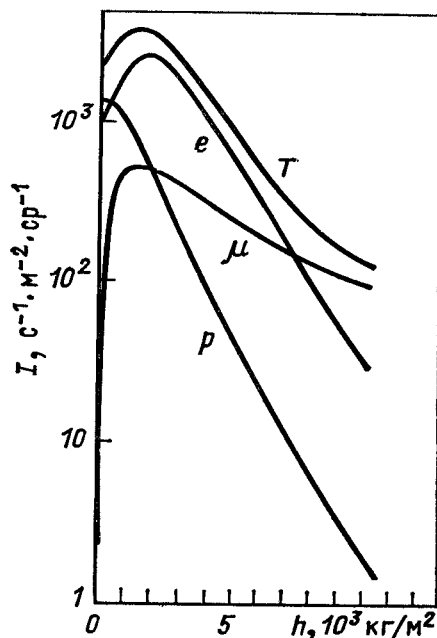


Рис. 43.11. Плотность потока КЛ по вертикали как функция глубины в атмосфере (г. Саскатун, географическая широта  $60,5^\circ$ , долгота  $311,9^\circ$ ) в год минимума солнечной активности:  
 $T$  — полная интенсивность;  $e$  — электроны;  $\mu$  — мюоны;  $p$  — протоны [35]

Таблица 43.3. Значения порога обрезания, ГВ, для вертикальных направлений [32]  
 ( $\delta$  — геомагнитная широта,  $\varphi$  — геомагнитная долгота)

| $\delta$ | $\varphi$ , град |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | 0                | 30   | 60   | 90   | 120  | 150  | 180  | 210  | 240  | 270  | 300  | 330  |
| 75       | 0,1              | 0,2  | 0,3  | 0,3  | 0,3  | 0,3  | 0,2  | 0,1  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| 60       | 1,1              | 1,5  | 1,7  | 1,8  | 2,0  | 2,2  | 1,8  | 1,1  | 0,4  | 0,2  | 0,2  | 0,6  |
| 45       | 4,7              | 5,4  | 5,8  | 6,2  | 6,6  | 7,0  | 5,6  | 4,2  | 2,4  | 1,3  | 1,4  | 3,0  |
| 30       | 11,2             | 12,1 | 13,3 | 14,4 | 14,4 | 13,6 | 11,9 | 9,9  | 9,4  | 4,6  | 4,2  | 8,9  |
| 15       | 14,5             | 15,5 | 16,6 | 17,5 | 17,0 | 15,9 | 14,9 | 14,1 | 13,0 | 9,8  | 9,3  | 13,2 |
| 0        | 14,0             | 14,8 | 16,1 | 17,0 | 16,8 | 16,2 | 15,8 | 15,2 | 14,6 | 13,6 | 13,1 | 13,7 |
| —15      | 11,0             | 11,5 | 12,4 | 13,0 | 13,4 | 13,7 | 14,2 | 14,4 | 14,2 | 13,7 | 13,0 | 12,3 |
| —30      | 6,8              | 6,1  | 5,7  | 5,1  | 5,2  | 6,0  | 8,0  | 9,5  | 12,1 | 12,3 | 11,4 | 10,3 |
| —45      | 3,7              | 2,7  | 2,1  | 1,4  | 1,1  | 1,6  | 2,8  | 4,3  | 5,9  | 9,3  | 8,6  | 6,5  |
| —60      | 1,9              | 1,1  | 0,6  | 0,2  | 0,1  | 0,2  | 0,5  | 1,2  | 2,3  | 3,9  | 4,2  | 3,3  |
| —75      | 0,6              | 0,3  | 0,1  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,2  | 0,6  | 0,9  | 1,2  | 1,0  |

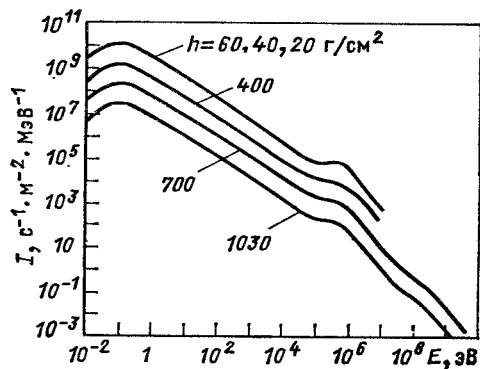


Рис. 43.12. Равновесная плотность потока нейтронов как функция энергии на различных глубинах в атмосфере на широте  $44^\circ$  [33]. Поток нейтронов у земной поверхности в области энергии  $1-10^7$  эВ претерпевает значительные флуктуации с изменением свойств почвы (например, при наличии или отсутствии влаги) и других трудно учитываемых локальных факторов

$10^{12}$  эВ теряют энергию в основном на ионизацию вещества, их пробег примерно пропорционален энергии и достигает 1 км в грунте. Мюоны большей энергии поглощаются по экспоненциальному закону и проникают в грунт на глубину 3—5 км.) Не успевающие распасться пионы наряду с нуклонами продолжают каскад взаимодействий до энергий частиц порядка  $10^9$  эВ (так называемая ядерно-активная вторичная компонента КЛ). Распад  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  приводит к образованию электронно-фотонного ливня — электронно-фотонной вторичной компоненты КЛ (фотоны выбивают атомные электроны и порождают пары  $e^+e^-$ , радиационное торможение и аннигиляция которых вновь приводят к образованию фотонов) [24, 33, 34] (табл. 43.4, рис. 43.11—43.13).

Таблица 43.4. Диссипация энергии КЛ в атмосфере на геомагнитной широте  $50^\circ$  [33]

| Канал диссипации                  | Мощность,<br>$10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·ср) |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|
| Ионизация в атмосфере             | 120                                            |
| Остаточная энергия на уровне моря | 6                                              |
| Ядерные расщепления               | 24                                             |
| Нейтрито                          | 37                                             |
| Сумма                             | 187                                            |

Ливни вторичных частиц в атмосфере Земли, порождаемые первичными КЛ с энергией более  $10^{14}$  эВ, называются широкими атмосферными ливнями.

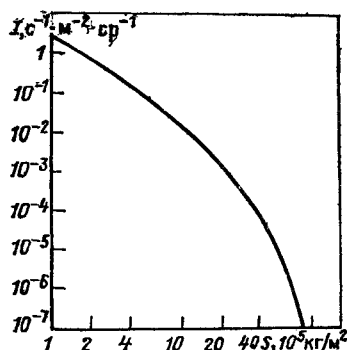


Рис. 43.13. Плотность потока мюонов на различных глубинах в зависимости от толщи  $S$  «стандартного грунта» (вещество со средней плотностью  $2,65 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, средним отношением заряда ядра к атомному номеру  $Z/A=0,5$  и средним значением  $Z^2/A=5,5$ ) [36]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
- 2 Астрофизика космических лучей/В. С. Березинский, С. В. Буланов, В. Л. Гинзбург, В. А. Догель, В. С. Птускин; Под. ред. В. Л. Гинзбурга. М.: Наука, 1984.
- 3 Дорман Л. И., Мирошниченко Л. И. Солнечные космические лучи. М.: Наука, 1968.
- 4 Eraker J. H.//Astrophys. J. 1982. Vol. 257. P. 862—880.
- 5 Garcia-Munoz M., Pyle K. R., Sympson J. A.//Astrophys. J. 1983. Vol. 274. P. L93—98.

6. Аллен К. У. Астрофизические величины: Пер. с англ./Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Мир, 1977.
7. Webber W. R., Lezniak J. A.//Astrophys. Space Sci. 1974. Vol. 30. P. 361—380.
8. Linsley J.//IAU Symp. N 94. Origin of Cosmic Rays/Ed. by G. Setti, G. Spada, A. Wolfendale. Dordrecht—Boston—Lond.: D Reidel Publ. Comp. 1980. P. 53—68.
9. Müller D., Tang J.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 2. P. 93—96.
10. Nishimura J., Fujii M., Taira T. e. a.//Astrophys. J. 1980. Vol. 238. P. 394—409.
11. Tan L. C., Ng L. K.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 2. P. 202—205.
12. Bogomolov E. A., Lubyanyaya N. D., Romanov V. A. e. a.//16th Intern. Cosmic Ray Conf. Kyoto. 1979. Vol. 1. P. 330—333.
13. Golden R. L., Horan S., Maguer B. G. e. a.//Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. P. 1196—1199.
14. Bogomolov E. A., Vasilev G. I., Krutkov S. V. e. a.//20th Intern. Cosmic. Ray Conf. Moscow. 1987. Vol. 2. P. 72—75.
15. Sympson J. A.//Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1983. Vol. 33. P. 323—381.
16. Webber W. R.//Astrophys. J. 1982. Vol. 255. P. 329—340.
17. Meyer P. See [8]. P. 7—22.
18. Israel M. H.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 12. P. 53—68.
19. Webber W. R.//Composition and Origin of Cosmic Rays/Ed. by M. M. Shapiro. Dordrecht—Boston—Lond.: D. Reidel Publ. Comp. 1983. P. 25—45.
20. Mewaldt R. A.//Rev. Geophys. Space Phys. 1983. Vol. 21. P. 295—305.
21. Meyer J.//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 3. P. 145—148.
22. Garcia-Munoz M., Mazon G. M., Sympson J. A.//Astrophys. J. 1977. Vol. 217. P. 859—877.
23. Linsley J.//18th Intern. Cosmic Ray Conf. Bangalore, 1983. Vol. 13. P. 135—192.
24. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.
25. Космические лучи и солнечный ветер/Г. Ф. Крымский, А. И. Кузьмин, П. А. Кривошапкин и др. Новосибирск: Наука, 1981.
26. Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983.
27. McKibben R. B., Pyle K. R., Sympson J. A.//Astrophys. J. 1982. Vol. 254. P. L23—27.
28. Evenson P., Garcia-Munoz M., Meyer P.//Astrophys. J. 1983. Vol. 275. P. L15—L18.
29. Vernov S. I., Charakchyan A. N., Stozhkov Yu. I.//14 th Intern Cosmic Ray Conf. Munich. 1975. Vol. 3. P. 1015—1019.
30. Мирошниченко Л. И., Петров В. М. Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985.
31. Дорман Л. И., Смирнов В. С., Тясто М. И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971.
32. Shee M. A., Smart D. F.//J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. P. 2021—2027.
33. Хаякава С. Физика космических лучей: Пер. с англ./Под ред. И. П. Иваненко. М.: Мир. 1973. Ч. 4. 1: Ядерно-физический аспект.
34. Hillas A. M. Cosmic Ray. Oxford: Pergamon Press. 1972.
35. Komori H.//J. Phys. Soc. Jap. 1962. Vol. 17. P. 457—460.
36. Мурзин В. С. Физика космических лучей: М.: Изд-во МГУ, 1970.

# ФИЗИКА ЗЕМЛИ

И. А. Маслов

## 44.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

## Строение Земли

### Фигура Земли

Под действительной фигурой Земли понимают фигуру ее физической поверхности, т. е. поверхности суши, океанов, морей, озер. В научных исследованиях и при решении практических задач для описания фигуры Земли используется поверхность геоида, т. е. поверхность уровня потенциала силы тяжести.

Наконец, для научного и практического использования принимается обобщенная, достаточно простая математическая аппроксимация — эллипсоид вращения, параметры которого подбирают из условия наилучшего соответствия фигуре геоида (более строго — квазигеоида).

В ряде случаев наряду с чисто геометрическим понятием земного эллипсоида используют понятие Нормальной Земли, масса которой равна массе реальной Земли, а поверхностью является эллипсоид вращения. В 1967 г. на съезде Международной ассоциации геодезии была принята модель Нормальной Земли [1]. В 1975 г. XVI Генеральной ассамблеей международной ассоциации геодезии были уточнены физические параметры «Нормальной Земли 1967 г.» [2]:

|                                                                                                         |                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Геоцентрическая гравитационная постоянная $GM$ , $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . .             | 3 986 005 · 10 <sup>8</sup> |
| Геоцентрическая гравитационная постоянная атмосферы $GM_a$ , $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . . | 35 · 10 <sup>7</sup>        |
| Зональные гармонические коэффициенты разложения потенциала сила тяжести:                                |                             |
| $I_2$ . . . . .                                                                                         | 108 263 · 10 <sup>-8</sup>  |
| $I_3$ . . . . .                                                                                         | 254 · 10 <sup>-8</sup>      |
| $I_4$ . . . . .                                                                                         | 161 · 10 <sup>-8</sup>      |
| $I_5$ . . . . .                                                                                         | 23 · 10 <sup>-8</sup>       |
| $I_6$ . . . . .                                                                                         | 54 · 10 <sup>-8</sup>       |
| Экваториальный радиус Земли $a_e$ , м . . . . .                                                         | 6 378 140                   |
| Ускорение свободного падения на экваторе $g$ , $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . .                 | 978 032 · 10 <sup>-5</sup>  |
| Обратное сжатие $f^{-1}$ . . . . .                                                                      | 298 257 · 10 <sup>-3</sup>  |
| Потенциал силы тяжести на геоиде $W_0$ , $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ . . . . .                     | 6 263 683 · 10              |
| Геопотенциальный масштабный коэффициент $R_0 = GM/W_0$ , м . . . . .                                    | 6 363 676                   |

В СССР в 1946 г. в качестве фигуры Земли принят эллипсоид Красовского с параметрами [3]:

|                                                            |                          |
|------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Экваториальный радиус $a$ , м . . . . .                    | 6 378 245                |
| Полярный радиус $b$ , м . . . . .                          | 6 356 863                |
| Обратное сжатие $f^{-1}$ . . . . .                         | 298,3                    |
| Площадь поверхности эллипсоида, $\text{км}^2$ . . . . .    | 5,10 · 10 <sup>8</sup>   |
| Объем эллипсоида, $\text{км}^3$ . . . . .                  | 1,083 · 10 <sup>12</sup> |
| Средний радиус равновеликой сферы $R$ , м . . . . .        | 6 371 110                |
| Средняя плотность Земли $\rho$ , $\text{г/см}^3$ . . . . . | 5,517                    |
| Масса Земли, имеющей среднюю плотность $M$ , г . . . . .   | 5,975 · 10 <sup>27</sup> |

Зависимость между приращениями геодезической широты  $dB$  и долготы  $dL \cos B$  и приращениями дуг меридиана  $dx$  и параллели  $dy$  для эллипсоида Красовского имеет вид [3]

|                              |        |         |        |
|------------------------------|--------|---------|--------|
| $dL \cos B$ , $dB$ . . . . . | 1''    | 1'      | 1°     |
| $dx$ , $dy$ . . . . .        | 30,9 м | 1,85 км | 111 км |
| $dx$ , $dy$ . . . . .        | 100 м  | 1 км    | 100 км |
| $dL \cos B$ , $dB$ . . . . . | 3,23'' | 32''    | 54'    |

Форма Земли, близкая к эллипсоиду вращения, указывает на то, что вещество Земли находится в гидростатическом равновесии по отношению к действующим на него силам (притяжения и центробежным), т. е. Земля ведет себя по отношению к длительно действующим силам как жидкое тело [4, 5]. По оценкам вязкость Земли равна  $10^{22}$  Па·с.

В то же время модуль сдвига, определенный для Земли в целом по кратковременным воздействиям (землетрясения, приливы и перемещения масс в атмосфере и др.) составляет около  $15 \cdot 10^{10}$  Н·м<sup>-2</sup>. Таким образом, земной шар является вязкоупругим телом с периодом релаксации  $\tau \approx 10^{10}$  с.

Упругие свойства внутри Земли изменяются на некоторых определенных значениях глубин скачком и плавно в пределах слоев, разделенных этими границами. Важнейшими границами являются поверхность Мохоровичича, залегающая на глубине 10—70 км, и поверхность Вихерта — Гутенберга на глубине 2900 км, резко преломляющая продольные упругие волны и не пропускающая поперечных волн. Эти границы разделяют земной шар на три главные зоны: кору, мантию и ядро. Кора обладает наибольшей жесткостью, мантия характеризуется высокой вязкостью, а ядро находится в состоянии, близком к жидкому, и реагирует лишь на продольные волны изменением объема. Внутри трех главных зон земного шара имеются менее четко выраженные границы. Масса литосферы составляет основную часть массы оболочки Земли [5]:

| атмосфера             | океан                | кора                  | мантия | ядро   |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------|--------|
| $0,854 \cdot 10^{-6}$ | $0,23 \cdot 10^{-3}$ | $0,435 \cdot 10^{-2}$ | 0,6697 | 0,3259 |

Внутреннее строение Земли оценивается по известной массе, моменту инерции земного шара и на основе изучения упругих волн от землетрясений. Получено, что плотность вещества в центре Земли  $\rho_d \geq 12,2$  г/см<sup>3</sup> и ядро Земли отделено на глубине 2900 км от лежащих выше слоев резким скачком плотности, порядка 4 г/см<sup>3</sup>. Скачкообразные изменения плотности с глубиной могут быть вызваны изменением как состава пород, так и их фазового состояния [6]. Кора континентов в 3—10 раз толще коры океана. Толщина коры континентов различна на платформах (30—40 км) и в геосинклиналях (40—80 км). В зонах самых высоких гор Памира и Гималаев она достигает 70—80 км. Нижняя граница коры — граница Мохоровичича  $M$  — в этих областях образует корни гор, которые глубоко (на 30—40 км) по сравнению с платформенными равнинными районами внедряются в мантию. Кора океанов — тонкая, около 4—8 км. Граница  $M$  залегает здесь на глубине 10—15 км. Разность глубин границы  $M$  на континентах и в океанах составляет 20—50 км. Средняя плотность коры на континентах 2,7—2,8 г/см<sup>3</sup>, под океанами 2,9 г/см<sup>3</sup>. Плотность верхней мантии 3,3—3,4 г/см<sup>3</sup>. На континентах поверхность мантии образует впадины, в океанах — огромные выступы. Земная кора континентов и океанов различается по значениям скорости распространения упругих волн. Кора океанов не содержит слоев со скоростью распространения продольных волн 6 км/с, характерных для коры континентов.

В земной коре различают два главных слоя: осадочный, состоящий из пород, залегающих почти гори-

зонально, и консолидированный, или кристаллический. Скорости распространения упругих волн в осадочных породах имеют широкие пределы, но в толстых слоях обычно не превышают 5 км/с. В консолидированной части коры скорость распространения упругих волн выше 6 км/с (на континентах в верхней части консолидированной коры близка к 6 км/с, в нижней — к 7 км/с; в океанах 6,5 — 7 км/с).

Внутреннее строение Земли описывается моделями,

характеризующими изменения с возрастанием глубины плотности, давления, ускорения свободного падения, скорости сейсмических волн и других параметров. Классические модели сферически-симметричны.

Принято учитывать различия глубинного строения Земли путем построения моделей Земли океанического и континентального типов и средней модели Земли, являющейся их комбинацией (табл. 44.1).

Т а б л и ц а 44.1. Физические параметры моделей Земли [7]

| Радиус, км            | Глубина, км | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Скорость продольных волн, км/с <sup>-1</sup> | Скорость поперечных волн, км/с <sup>-1</sup> | Модуль сжатия, 10 <sup>8</sup> Па | Модуль сдвига, 10 <sup>8</sup> Па | Давление, 10 <sup>8</sup> Па | Ускорение свободного падения, см/с <sup>2</sup> |
|-----------------------|-------------|------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| 0                     | 6371,0      | 13,012                       | 11,241                                       | 3,565                                        | 14 237                            | 1653                              | 3632,4                       | 0                                               |
| 1217,1                | 5153,9      | 12,704                       | 11,091                                       | 3,439                                        | 13 625                            | 1502                              | 3288,7                       | 436,2                                           |
| 1217,1                | 5153,9      | 12,139                       | 10,258                                       | 0,000                                        | 12 773                            | 0                                 | 3288,7                       | 436,2                                           |
| 3485,7                | 2885,3      | 9,909                        | 8,002                                        | 0,000                                        | 6 345                             | 0                                 | 1354,0                       | 1069,3                                          |
| 3485,7                | 2885,3      | 5,550                        | 13,732                                       | 7,243                                        | 6 582                             | 2911                              | 1354,0                       | 1069,3                                          |
| 5701,0                | 670,0       | 5,377                        | 10,928                                       | 6,114                                        | 3 045                             | 1639                              | 239,1                        | 1001,2                                          |
| 5701,0                | 670,0       | 4,077                        | 10,038                                       | 5,417                                        | 2 480                             | 1220                              | 239,1                        | 1001,2                                          |
| 5951,0                | 420,0       | 3,768                        | 9,554                                        | 5,052                                        | 2 157                             | 961                               | 141,1                        | 997,6                                           |
| Океаническая Земля    |             |                              |                                              |                                              |                                   |                                   |                              |                                                 |
| 5951,0                | 420,0       | 3,553                        | 8,949                                        | 4,789                                        | 1 758                             | 815                               | 141,1                        | 997,6                                           |
| 6360,0                | 11,0        | 3,305                        | 7,900                                        | 4,550                                        | 1 150                             | 684                               | 2,2                          | 983,5                                           |
| 6360,0                | 11,0        | 2,850                        | 6,400                                        | 3,700                                        | 647                               | 390                               | 2,2                          | 983,5                                           |
| 6366,0                | 5,0         | 2,850                        | 6,400                                        | 3,700                                        | 647                               | 390                               | 0,6                          | 983,0                                           |
| 6366,0                | 5,0         | 1,500                        | 2,000                                        | 1,000                                        | 40                                | 15                                | 0,6                          | 983,0                                           |
| 6367,0                | 4,0         | 1,500                        | 2,000                                        | 1,000                                        | 40                                | 15                                | 0,4                          | 982,9                                           |
| 6367,0                | 4,0         | 1,030                        | 1,500                                        | 0,000                                        | 23                                | 0                                 | 0,4                          | 982,9                                           |
| 6371,0                | 0,0         | 1,030                        | 1,500                                        | 0,000                                        | 23                                | 0                                 | 0                            | 982,0                                           |
| Континентальная Земля |             |                              |                                              |                                              |                                   |                                   |                              |                                                 |
| 5951,0                | 420,0       | 3,553                        | 9,135                                        | 4,816                                        | 1865                              | 823                               | 140,7                        | 997,6                                           |
| 6336,0                | 35,0        | 3,320                        | 8,020                                        | 4,690                                        | 1161                              | 730                               | 9,7                          | 984,2                                           |
| 6336,0                | 35,0        | 2,920                        | 6,500                                        | 3,750                                        | 686                               | 410                               | 9,7                          | 984,2                                           |
| 6351,0                | 20,0        | 2,320                        | 6,500                                        | 3,750                                        | 686                               | 410                               | 5,3                          | 983,3                                           |
| 6351,0                | 20,0        | 2,720                        | 5,800                                        | 3,450                                        | 483                               | 323                               | 5,3                          | 983,3                                           |
| 6371,0                | 0,0         | 2,720                        | 5,800                                        | 3,450                                        | 483                               | 323                               | 0,0                          | 981,6                                           |
| Средняя Земля         |             |                              |                                              |                                              |                                   |                                   |                              |                                                 |
| 5951,0                | 420,0       | 3,553                        | 8,967                                        | 4,806                                        | 1762                              | 820                               | 141,1                        | 997,6                                           |
| 6352,0                | 19,0        | 3,310                        | 7,934                                        | 4,654                                        | 1127                              | 716                               | 4,8                          | 983,7                                           |
| 6352,0                | 19,0        | 2,902                        | 6,500                                        | 3,750                                        | 681                               | 408                               | 4,8                          | 983,7                                           |
| 6357,0                | 14,0        | 2,902                        | 6,500                                        | 3,750                                        | 681                               | 408                               | 3,3                          | 983,4                                           |
| 6357,0                | 14,0        | 2,802                        | 6,000                                        | 3,550                                        | 537                               | 353                               | 3,3                          | 983,4                                           |
| 6368,0                | 3,0         | 2,802                        | 6,000                                        | 3,550                                        | 537                               | 353                               | 0,3                          | 982,6                                           |
| 6368,0                | 3,0         | 1,030                        | 1,500                                        | 0,000                                        | 23                                | 0                                 | 0,3                          | 982,6                                           |
| 6371,0                | 0,0         | 1,030                        | 1,500                                        | 0,000                                        | 23                                | 0                                 | 0,0                          | 981,9                                           |

#### 44.2. ЛИТОСФЕРА

##### Состав и свойства (табл. 44.2—44.4)

Литосфера состоит из осадочных и кристаллических пород. В пределах литосферы различают два резко различных региона [8]: глубинную океаническую область (площадь 268 млн. км<sup>2</sup>, средняя глубина ниже уровня моря 4,5 км, мощность слоя 6 км) и область континентального щита (105 млн. км<sup>2</sup>, средняя высота над уровнем моря 0,75 км, мощность слоя 35,05 км). Различают две переходные области: область молодых складчатых поясов (42 млн. км<sup>2</sup>) и субокеаническую область (93 млн. км<sup>2</sup>). Площадь 2 млн. км<sup>2</sup> суши в основном представляет собой вулканические острова,

##### Поле силы тяжести

Поле силы тяжести на поверхности Земли определяется потенциалом и его первыми и вторыми производными [12]. Приведем эти величины в прямоугольной системе координат с направлениями осей:  $x$  — на север,  $y$  — на восток,  $z$  — вниз по направлению отвесной линии. Потенциал  $W$  является суммой потенциалов притяжения земных масс (гравитационного потенциала) и центробежных сил, возникающих при вращении Земли (центробежного потенциала), и выражается в джоулях.

Для его первой производной (ускорения свободного падения)  $g_z = dW/dz$  (табл. 44.5) и вторых производных ( $W_{xx}$ ,  $W_{yy}$ , ...) введены специальные наимено-

Т а б л и ц а 44.2. Средний химический состав литосферы [6]

| Соединение                     | Масса, 10 <sup>18</sup> кг | Содержание, % | Соединение                     | Масса, 10 <sup>18</sup> кг | Содержание, % |
|--------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 13 050                     | 55,2          | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 661                        | 2,8           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3 629                      | 15,3          | K <sub>2</sub> O               | 452                        | 1,9           |
| CaO                            | 2 082                      | 8,8           | TiO <sub>2</sub>               | 385                        | 1,6           |
| FeO                            | 1 381                      | 5,8           | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 62,0                       | 0,3           |
| MgO                            | 1 234                      | 5,2           | MnO                            | 42,6                       | 0,2           |
| Na <sub>2</sub> O              | 682                        | 2,9           |                                |                            |               |

Т а б л и ц а 44.3. Основные физические свойства горных пород [9]

| Свойство                                                       | Пределы значений для горных пород |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
|                                                                | магматических и метаморфических   | осадочных |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                   | 2,5—3,3                           | 1,9—2,9   |
| Пористость, %                                                  | До 10                             | До 40     |
| Магнитная восприимчивость, 10 <sup>-9</sup> м <sup>3</sup> /кг | 100—4000                          | До 600    |
| Остаточное намагничивание, 10 <sup>-3</sup> А/м                | До 320                            | —         |
| Модуль Юнга, 10 <sup>11</sup> г/см <sup>2</sup>                | 5—30                              | 2,5—12    |
| Коэффициент Пуассона                                           | 0,21—0,28                         | 0,23—0,27 |
| Скорость распространения продольных колебаний, км/с            | 4,9—10,1                          | 0,5—5,9   |
| Удельное электрическое сопротивление, Ом·м                     | 400—100 000                       | 0,3—5000  |
| Теплопроводность, Вт/(см·К)                                    | 0,001—0,03                        | 0,01—0,03 |
| Удельная теплоемкость, Дж/(г·К)                                | 0,5—1,17                          | 0,67—0,96 |

Т а б л и ц а 44.4. Распространенность химических элементов в земной коре [10, 11]

| Атомный номер | Элемент  | Массовое содержание, % |
|---------------|----------|------------------------|
| 1             | Водород  | 1,00                   |
| 2             | Гелий    | 10 <sup>-6</sup>       |
| 3             | Литий    | 5·10 <sup>-3</sup>     |
| 4             | Бериллий | 4·10 <sup>-4</sup>     |
| 5             | Бор      | 5·10 <sup>-3</sup>     |
| 6             | Углерод  | 0,35                   |
| 7             | Азот     | 0,04                   |
| 8             | Кислород | 49,13                  |
| 9             | Фтор     | 0,08                   |
| 10            | Неон     | 5·10 <sup>-7</sup>     |
| 11            | Натрий   | 2,40                   |
| 12            | Магний   | 2,35                   |
| 13            | Алюминий | 7,45                   |
| 14            | Кремний  | 26,00                  |
| 15            | Фосфор   | 0,12                   |
| 16            | Сера     | 0,10                   |
| 17            | Хлор     | 0,20                   |

Продолжение табл. 44.4

| Атомный номер | Элемент   | Массовое содержание, % |
|---------------|-----------|------------------------|
| 18            | Аргон     | 4·10 <sup>-4</sup>     |
| 19            | Калий     | 2,35                   |
| 20            | Кальций   | 3,25                   |
| 21            | Скандий   | 6·10 <sup>-4</sup>     |
| 22            | Титан     | 0,61                   |
| 23            | Ванадий   | 0,02                   |
| 24            | Хром      | 0,03                   |
| 25            | Марганец  | 0,10                   |
| 26            | Железо    | 4,20                   |
| 27            | Кобальт   | 2·10 <sup>-3</sup>     |
| 28            | Никель    | 0,02                   |
| 29            | Медь      | 0,01                   |
| 30            | Цинк      | 0,02                   |
| 31            | Галлий    | 10 <sup>-4</sup>       |
| 32            | Германий  | 4·10 <sup>-4</sup>     |
| 33            | Мышьяк    | 5·10 <sup>-4</sup>     |
| 34            | Селен     | 8·10 <sup>-5</sup>     |
| 35            | Бром      | 10 <sup>-3</sup>       |
| 36            | Криптон   | 2·10 <sup>-8</sup>     |
| 37            | Рубидий   | 8·10 <sup>-3</sup>     |
| 38            | Стронций  | 0,035                  |
| 39            | Иттрий    | 5·10 <sup>-3</sup>     |
| 40            | Цирконий  | 0,025                  |
| 41            | Ниобий    | 3,2·10 <sup>-5</sup>   |
| 42            | Молибден  | 10 <sup>-3</sup>       |
| 44            | Рутений   | 5·10 <sup>-6</sup>     |
| 45            | Родий     | 10 <sup>-6</sup>       |
| 46            | Палладий  | 5·10 <sup>-6</sup>     |
| 47            | Серебро   | 5·10 <sup>-6</sup>     |
| 48            | Кадмий    | 5·10 <sup>-4</sup>     |
| 49            | Индий     | 10 <sup>-5</sup>       |
| 50            | Олово     | 8·10 <sup>-3</sup>     |
| 51            | Сурьма    | 5·10 <sup>-5</sup>     |
| 52            | Теллур    | 10 <sup>-6</sup>       |
| 53            | Йод       | 10 <sup>-4</sup>       |
| 54            | Ксенон    | 3·10 <sup>-9</sup>     |
| 55            | Цезий     | 10 <sup>-3</sup>       |
| 56            | Барий     | 0,05                   |
| 57            | Лантан    | 6,5·10 <sup>-4</sup>   |
| 58            | Церий     | 2,9·10 <sup>-3</sup>   |
| 59            | Празеодим | 4,5·10 <sup>-4</sup>   |
| 60            | Неодим    | 1,7·10 <sup>-3</sup>   |
| 62            | Самарий   | 7·10 <sup>-4</sup>     |
| 63            | Европий   | 2·10 <sup>-5</sup>     |
| 64            | Гадолиний | 7,5·10 <sup>-4</sup>   |
| 65            | Тербий    | 10 <sup>-4</sup>       |
| 66            | Диспрозий | 7,5·10 <sup>-4</sup>   |
| 67            | Гольмий   | 10 <sup>-4</sup>       |
| 68            | Эрбий     | 6,5·10 <sup>-4</sup>   |
| 69            | Тулий     | 10 <sup>-4</sup>       |
| 70            | Иттербий  | 8·10 <sup>-4</sup>     |
| 71            | Лютеций   | 1,7·10 <sup>-4</sup>   |
| 72            | Гафний    | 4·10 <sup>-4</sup>     |
| 73            | Тантал    | 2,4·10 <sup>-5</sup>   |
| 74            | Вольфрам  | 7·10 <sup>-3</sup>     |
| 75            | Рений     | 10 <sup>-7</sup>       |
| 76            | Осмий     | 5·10 <sup>-6</sup>     |
| 77            | Иридий    | 10 <sup>-6</sup>       |
| 78            | Платина   | 2·10 <sup>-5</sup>     |
| 79            | Золото    | 5·10 <sup>-7</sup>     |
| 80            | Ртуть     | 5·10 <sup>-6</sup>     |
| 81            | Таллий    | 10 <sup>-5</sup>       |
| 82            | Свинец    | 1,6·10 <sup>-3</sup>   |
| 83            | Висмут    | 10 <sup>-5</sup>       |
| 90            | Торий     | 10 <sup>-3</sup>       |
| 92            | Уран      | 4·10 <sup>-4</sup>     |

вания единиц: для  $g - 1 \text{ гал} = 1 \text{ см/с}^2$  и для вторых производных — этвеш, обозначается буквой  $E$ :  $1 \text{ этвеш} = E = 10^{-9} \text{ с}^2$ .

Т а б л и ц а 44.5 Зависимость ускорения свободного падения  $g$ ,  $\text{см} \cdot \text{с}^{-2}$ , от широты места  $\varphi$ , град, на поверхности эллипсоида Красовского [12]

| $\varphi$ | $g$      | $\varphi$ | $g$      | $\varphi$ | $g$      |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 0         | 978,0300 | 30        | 979,3212 | 60        | 981,9140 |
| 5         | 978,0692 | 35        | 979,7299 | 65        | 982,2853 |
| 10        | 978,1856 | 40        | 980,1659 | 70        | 982,6061 |
| 15        | 978,3757 | 45        | 980,6159 | 75        | 982,8664 |
| 20        | 978,6338 | 50        | 981,0663 | 80        | 983,0584 |
| 25        | 978,9521 | 55        | 981,5034 | 85        | 983,1759 |
|           |          |           |          | 90        | 983,2155 |

Значения вторых производных потенциала — силы тяжести на поверхности эллипсоида Красовского выражаются формулами,  $10^{-9} \text{ с}^2$ :

$$W_{yy} - W_{xx} \equiv W_{\Delta} = 5,1 (1 + \cos 2\varphi); W_{xy} = 0;$$

$$W_{yz} = 0; W_{xz} = 8,1 \sin 2\varphi; W_{zz} = -3086 (1 + 0,00071 \cos 2\varphi).$$

Периодические изменения  $g$  [12] на поверхности Земли, обусловленные влиянием Луны, составляют до  $2,49 \cdot 10^{-4} \text{ см/с}^2$ . Амплитуда солнечного приливного действия составляет  $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ см/с}^2$ , так что суммарное влияние Луны и Солнца на  $g$  достигает  $3,45 \cdot 10^{-4} \text{ см/с}^2$ . Амплитуда приливных изменений  $g$  зависит от широты места наблюдения.

### Сейсмичность [13]

**Землетрясения** — колебания Земли, вызываемые прохождением сейсмических волн из какого-либо источника сейсмической энергии. **Интенсивность (сила)**

Т а б л и ц а 44.6. Шкала землетрясений [14, 15]

| Балл | Наименование       | Смещение, мм | Ускорение, мм/с | Характеристика                                                                                       |
|------|--------------------|--------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Незаметное         | —            | 2,5             | Колебания почвы отмечаются приборами (микросейсмы)                                                   |
| 2    | Очень слабое       | —            | 2,5—5,0         | Изредка ощущаются людьми                                                                             |
| 3    | Слабое             | —            | 5—10            | Отмечаются немногими людьми                                                                          |
| 4    | Умеренное          | 0,5          | 10—15           | Отмечаются многими людьми. Возможно колебание окон, дверей                                           |
| 5    | Довольно сильное   | 0,5—1        | 25—230          | Качания висящих предметов, скрип полов, осыпание побелки                                             |
| 6    | Сильное            | 1,1—2        | 50—100          | Легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке, трещины в печах и т. д.                   |
| 7    | Очень сильное      | 2,1—4        | 100—250         | Значительные повреждения в зданиях; откалывание отдельных кусков штукатурки, тонкие трещины в стенах |
| 8    | Разрушительное     | 4,1—8        | 250—500         | Разрушения в зданиях: большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб                       |
| 9    | Опустошительное    | 8,1—16       | 500—1000        | В некоторых зданиях обвалы: падение стен, перекрытий, кровли                                         |
| 10   | Уничтожающее       | 16,1—32      | 1000—2500       | Обвалы во многих зданиях, трещины в грунте около метра шириной                                       |
| 11   | Катастрофическое   | 32           | 2500—5000       | Многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах                                  |
| 12   | Сильная катастрофа | —            | > 5000          | Изменение рельефа в больших размерах                                                                 |

землетрясения определяется по степени разрушения зданий, характеру изменения земной поверхности и по данным об испытанных людьми ощущениях (табл. 44.6, 44.7) **Магнитуда землетрясения** (табл. 44.8) — показатель энергии очага, выражается в виде десятичного логарифма амплитуды наибольшего колебания грунта, записанного при прохождении сейсмической волны того или иного типа с внесением поправок, выражающих средние эмпирические зависимости интенсивности для коровых землетрясений от эпицентрального расстояния, а для подкоровых — еще и от глубины очага. Наиболее употребительны три шкалы магнитуд: рихтеровская (или локальная)  $M_L$ ; определяемая по объемным продольным волнам  $m$  или  $m_b$ ; определяемая по поверхностным волнам  $M_s$ . Между шкалами существуют некоторые различия, зависящие от энергии землетрясения. Зависимость между энергией упругих волн, Дж, и магнитудой может быть задана уравнением типа

$$\log E_0 = 5,24 + 1,44 M_s.$$

Для определения магнитуды достаточно знания эмпирических зависимостей, характеризующих строение и свойства Земли на пути распространения волн, а для установления сейсмической энергии в очаге необходимо их детальное знание. Поэтому магнитуда как показатель интенсивности землетрясения в очаге в последние десятилетия стала преобладающей характеристикой.

**Упругие волны в Земле** [15]. Распространение упругих деформаций при землетрясениях носит волновой характер. Обычно исследуются продольные ( $P$ ) и поперечные ( $S$ ) объемные волны, а также поверхностные — волны Рэлея ( $R$ ), у которых колебание частиц происходит в плоскости, перпендикулярной поверхности и проходящей через направление сейсмического луча, и поперечные поверхностные волны Лява ( $L$ ).

Скорость сейсмических волн возрастает с увеличением глубины (табл. 44.1).

**Микросейсмические колебания** [16, 17]. Планетарные микроскопические колебания поверхности Земли — микросейсмы первого рода — регистрируются в диапазоне частот от 0,03 до 100 Гц в зависимости от места,

Т а б л и ц а 44.7. Статистика землетрясений за 1918—1964 гг. [15]

| Магнитуда | Число толчков за 10 лет | Энергия за 10 лет, Дж |
|-----------|-------------------------|-----------------------|
| 8,5—8,9   | 3                       | $156 \cdot 10^{16}$   |
| 8,0—8,4   | 11                      | $113 \cdot 10^{16}$   |
| 7,5—7,9   | 31                      | $80 \cdot 10^{16}$    |
| 7,0—7,4   | 149                     | $58 \cdot 10^{16}$    |
| 6,5—6,9   | 560                     | $41 \cdot 10^{16}$    |
| 6,4—6,8   | 2100                    | $30 \cdot 10^{16}$    |

Т а б л и ц а 44.8. Энергия и магнитуда некоторых источников землетрясений [15]

| <i>m</i> | Энергия, Дж         | Примечание                                                                                |
|----------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0        | $1,7 \cdot 10^5$    | Для очень слабых толчков данные ненадежны                                                 |
| 1        | $4,8 \cdot 10^6$    |                                                                                           |
| 2        | $1,3 \cdot 10^8$    |                                                                                           |
| 2,5      | —                   | Самые слабые из ощутимых землетрясений                                                    |
| 3        | $3,6 \cdot 10^9$    |                                                                                           |
| 4        | $1,0 \cdot 10^{11}$ |                                                                                           |
| 5        | $2,7 \cdot 10^{12}$ | Самые слабые, вызывающие повреждение зданий                                               |
| 6,0      | $4,4 \cdot 10^{13}$ | Землетрясение в Скопле, 1963 г.                                                           |
| 7,0      | $2,1 \cdot 10^{15}$ | Землетрясение в Инаигахау, 1968 г.                                                        |
| 7,8      | —                   | Буллеровское землетрясение, 1929 г.                                                       |
| 7,9      | —                   | Землетрясение в Хокс-Бей, 1931 г.                                                         |
| 8,3      | —                   | Землетрясение в Сан-Франциско, 1906 г.                                                    |
| 8,4      | —                   | Чили, 1960 г., Аляска, 1964 г.                                                            |
| 8,9      | —                   | Самые сильные зарегистрированные сейсмические толчки: Колумбия, 1906 г., Санрику, 1933 г. |

условий наблюдения и частоты; они достигают 10 мкм для низкочастотных колебаний и уменьшаются до  $10^{-3}$  мкм в очень тихих районах для частоты  $\sim 1$  Гц.

Микросейсмы второго рода вызваны поверхностными источниками (транспорт, промышленные предприятия, прибой и др.); они имеют периоды от 0,001 до 0,1 с, зависят от грунтовых условий и быстро убывают с удалением от источника. Амплитуды смещений лежат в диапазоне  $\sim 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-2}$  мкм.

### Магнитное поле

Магнитное поле Земли характеризуется вектором напряженности  $T$ . Проекция вектора  $T$  на оси прямоугольной системы координат образуют составляющие геомагнитного поля:  $Z$  — вертикальную,  $X$  — северную,  $Y$  — восточную. Часто применяется также горизонтальная составляющая  $\sqrt{X^2 + Y^2}$ .

Угол между горизонтальным направлением  $H$  и географическим меридианом называется склонением  $D$ , а угол, образуемый вектором напряженности с горизонтальной плоскостью, — наклонением  $I$ .

**Постоянное магнитное поле** [18, 19]. Географическое распределение постоянного магнитного поля соответствует полю однородно намагниченной сферы с ко-

ординатами полюсов: Северного (в Южном полушарии)  $\varphi = 71,2^\circ$ ,  $\lambda = 150,8^\circ$  и южного (в Северном полушарии)  $\varphi = 70,5^\circ$ ,  $\lambda = 264^\circ$ . Линия, соединяющая магнитные полюсы, наклонена относительно географической оси на  $11,5^\circ$  и смещена от центра Земли на 1140 км в сторону Тихого океана. Напряженность магнитного поля на магнитном полюсе 19,5 А/м (0,65 Э), напряженность магнитного поля на магнитном экваторе 10,5 А/м (0,35 Э).

Параметры постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах:

| $T$                                            | $H$                                                              |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| От +18,6 до 21,8 А/м<br>(от +0,62 до —0,73 Э)  | От 0 до $\pm 12,3$ А/м<br>(от 0 до +0,41 Э)                      |
| $Z$                                            | $D$                                                              |
| От +18,6 до —21,8 А/м<br>(от +0,62 до —0,73 Э) | От $-180^\circ$ до $+180^\circ$<br>От $-90^\circ$ до $+90^\circ$ |

Общими чертами магнитного поля материков и океанов являются [19]:

крупноблочная структура аномального магнитного поля с размерами участков различного характера поля от нескольких сотен километров и более;

наличие минимума в спектре аномального поля от 400 до 4000 км;

наличие областей с отчетливой анизотропией поля. Значения аномалий магнитного поля континентов вблизи поверхности колеблются в пределах от нескольких десятых долей ампера на метр до нескольких амперов на метр и более вблизи выходов фундаментов платформ на поверхность.

Географическое распределение постоянного магнитного поля Земли с учетом магнитных аномалий площади от нескольких километров до целых материков изображается в виде карт, относящихся к определенной эпохе. Карты составляющих напряженности магнитного поля приведены на рис. 44.1—44.5 [19].

**Вековые вариации геомагнитного поля.** Средние значения элементов геомагнитного поля изменяются со временем. Сравнение элементов поля для 1885 и 1950 гг. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на  $7 \cdot 10^{-4}$ . Следовательно, короткий, в геологическом отношении отрезок времени недостаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

**Переменное магнитное поле Земли. Периодические вариации** [20]. Все периодические вариации магнитного поля Земли имеют источник вне Земли. Вариации классифицируют по длине периода, что является одновременно классификацией по физическим причинам. Выделяются солнечно-суточные вариации, вызванные суточным движением Земли вокруг Солнца, лунно-суточные, годовые, циклические с периодом 11 лет, связанные с изменением солнечной активности, и др. Амплитуды всех периодических вариаций, кроме солнечно-суточных, составляют единицы угловых минут склонения и тысячные доли А/м напряженности поля (табл. 44.9).

**Непериодические вариации магнитного поля Земли. Магнитные бури.** Магнитные бури и общая магнитная активность вызываются взаимодействием корпускулярного излучения Солнца с постоянным магнитным полем Земли. Магнитные бури — резкие, неправильной формы колебания магнитного поля Земли — начинаются одновременно на всем магнитном земном шаре и имеют тенденцию к повторению через 27 суток. Поле изменяется по значению и направлению на несколько процентов за время от нескольких часов до нескольких суток.

**Земные теллурические токи** [21, 22]. Токи и переменное магнитное поле — явления, связанные между

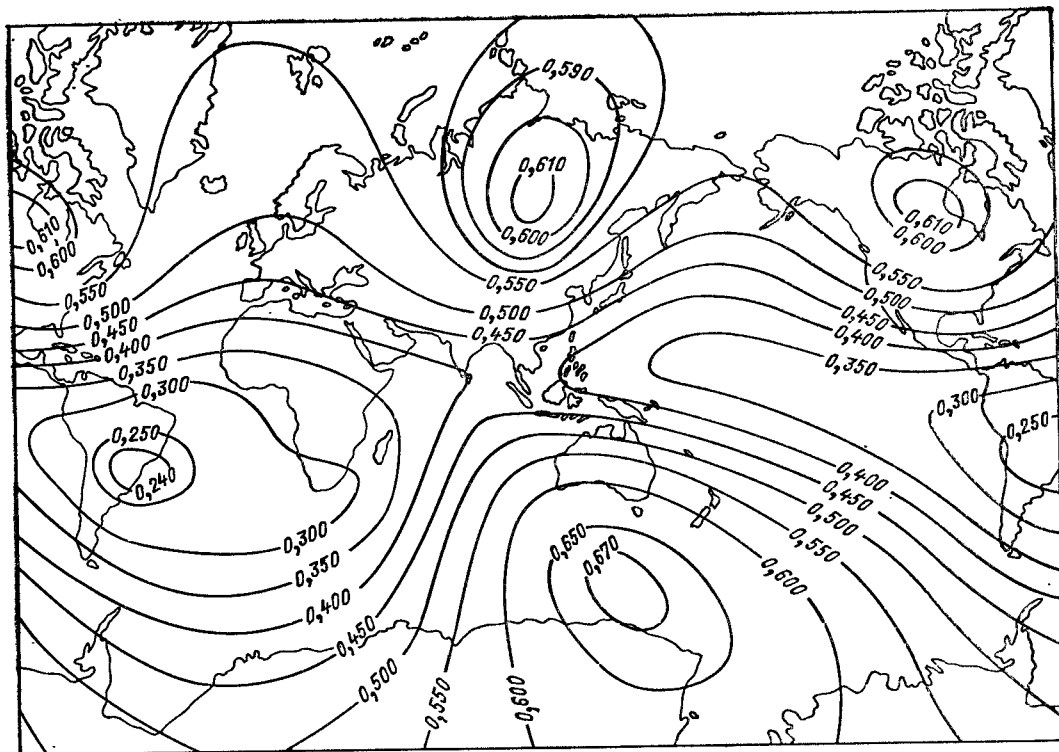


Рис. 44.1 Карта напряженности нормального геомагнитного поля  $T_n$ ,  $10^{-4}$  Тл, эпоха 1980 г. [19]

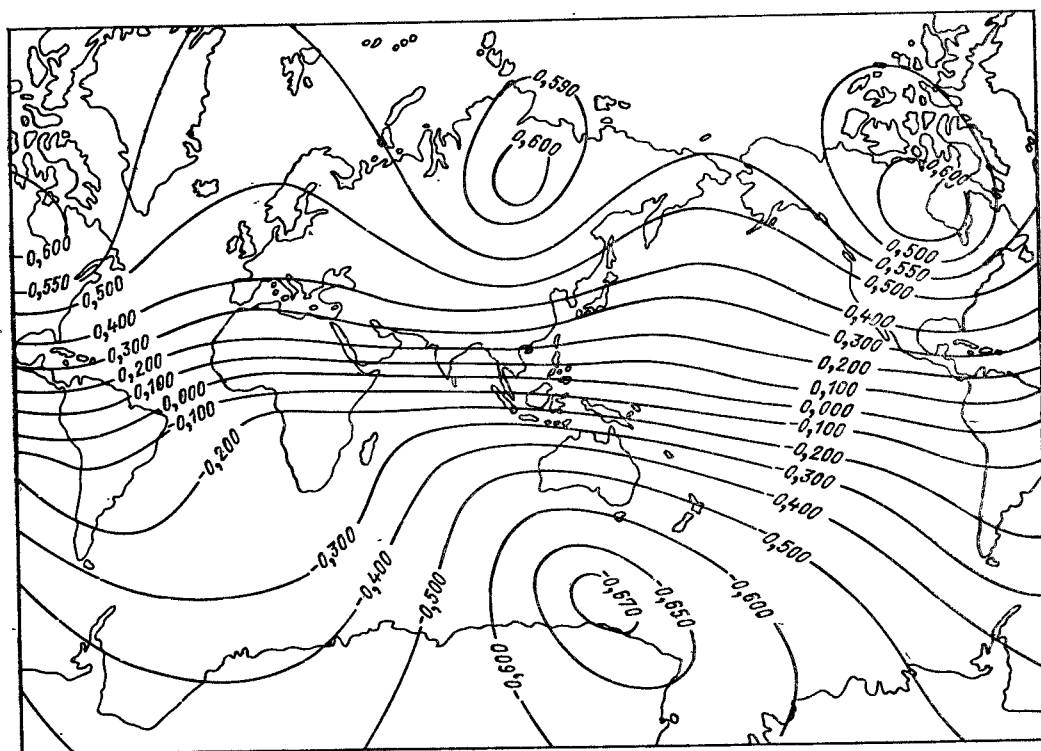


Рис. 44.2. Карта вертикальной составляющей  $Z_n$  нормального геомагнитного поля,  $10^{-4}$  Тл, эпоха 1980 г. [19]



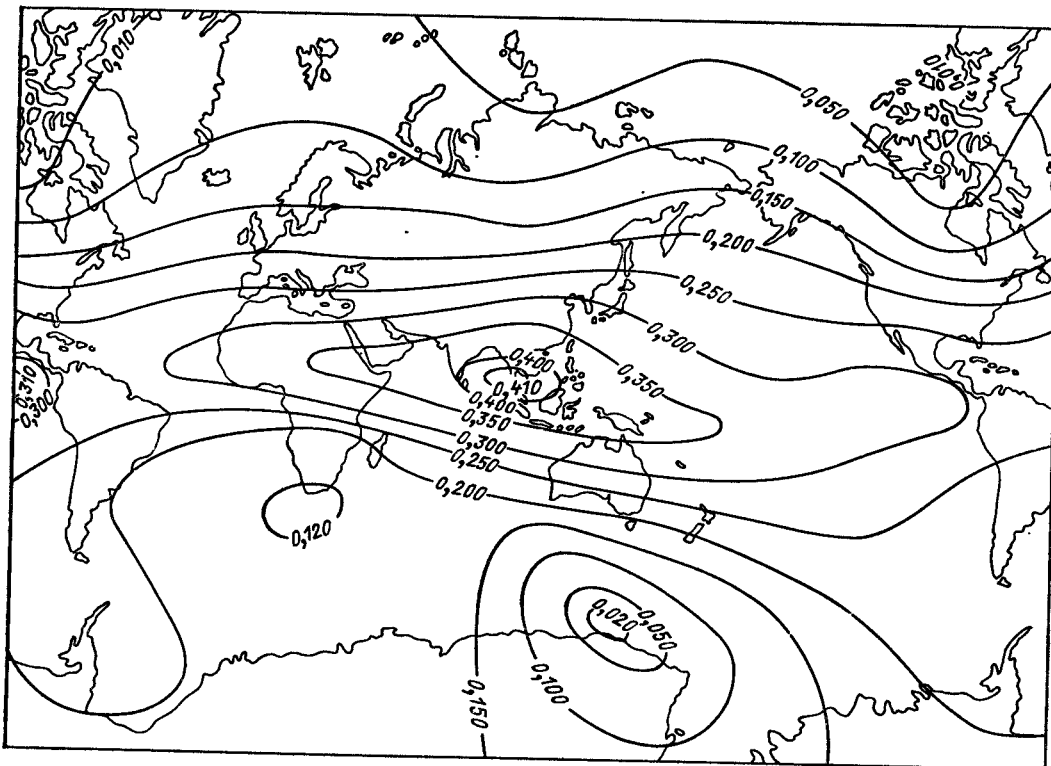


Рис. 44.3. Карта горизонтальной составляющей  $H_n$  нормального геомагнитного поля,  $10^{-4}$  Тл, эпоха 1980 г. [19]

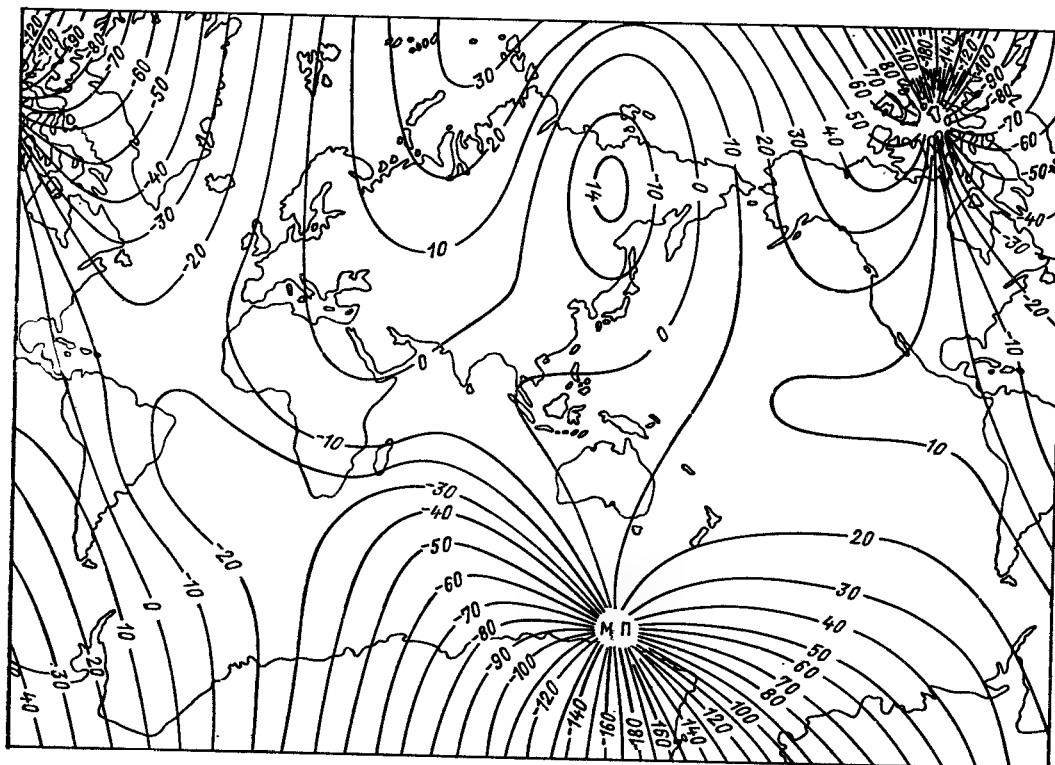


Рис. 44.4. Карта значений магнитного склонения, град, эпоха 1980 г. [19]

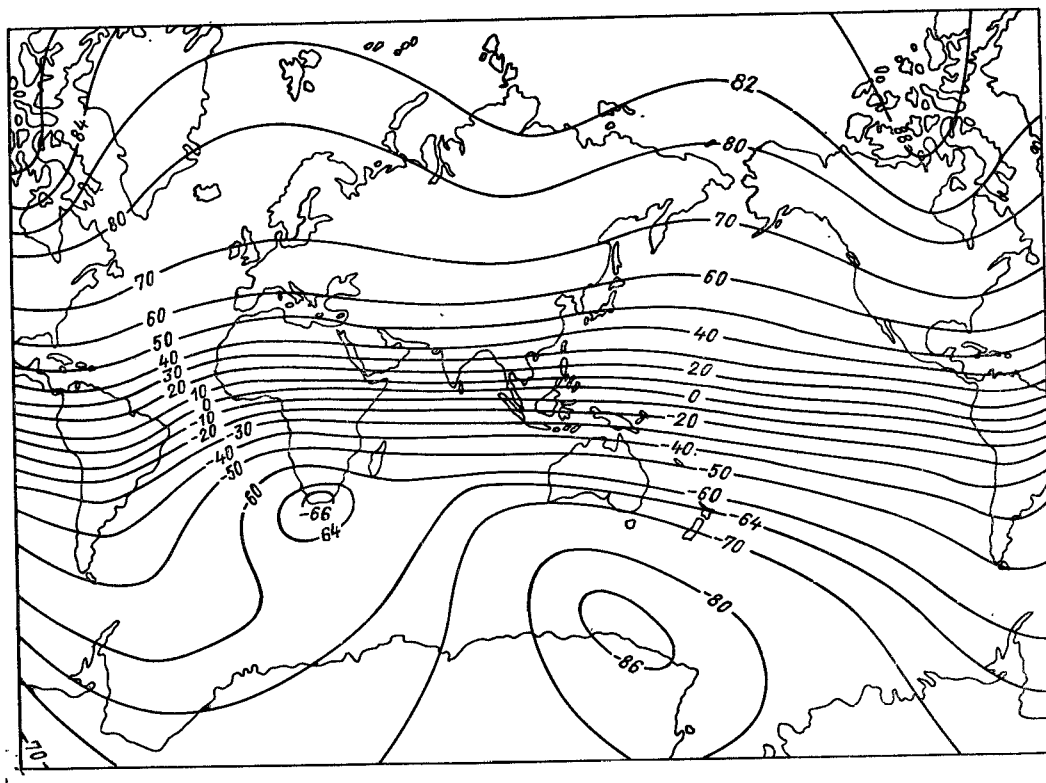


Рис. 44.5. Карта нормальных значений магнитного наклонения, град, эпоха 1980 г. [19]

Т а б л и ц а 44.9. Солиечно-суточные вариации геомагнитного поля,  $0,3 \cdot 10^{-3}$  А/м [20]

| Составляющая напряженности | Годы низкой магнитной активности |                 |                |                 | Годы высокой магнитной активности |                 |                |                 |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
|                            | Средние широты                   |                 | Высокие широты |                 | Средние широты                    |                 | Высокие широты |                 |
|                            | Спокойные дни                    | Возмущенные дни | Спокойные дни  | Возмущенные дни | Спокойные дни                     | Возмущенные дни | Спокойные дни  | Возмущенные дни |
| Горизонтальная $H$         | 7—40                             | 18—58           | 44—80          | 90—402          | 8—74                              | 25—109          | 27—77          | 50—460          |
| Вертикальная $Z$           | 4—16                             | 9—36            | 20—90          | 103—305         | 6—26                              | 14—128          | 15—70          | 128—315         |
| Модуль полного вектора     | 6—26                             | 11—64           | 20—65          | 150—300         | 8—35                              | 13—104          | 35—110         | 230—275         |

собой. Плотность теллурических токов  $j$  для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова:  $j=2$  А/км<sup>2</sup>. Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит нескольких десятков милливольт на километр. В полярных странах напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильны теллурические токи во время магнитных бурь.

### Тепловое поле

**Температура внутри Земли [23].** У поверхности Земли температура почвы и неглубоко залегающих горных пород определяется балансом тепла, получаемого от Солнца и излучаемого в атмосферу. Роль терморегулятора играют водная и воздушная оболочки Земли. В среднем глубина проникновения суточных колебаний температуры почвы в зависимости от ее свойства и гео-

графических условий изменяется от 35 до 100 см. Запоздывание наступления экстремумов в среднем составляет 2—3 ч на каждые 10 см глубины.

Глубина проникновения годовых колебаний температуры составляет в низких широтах около 5—10 м, а в средних и высоких 8—24 м, доходя до 30 м. Глубина проникновения вековых изменений больше 50 м и сохраняется надолго вследствие запаздывания температурной волны по фазе с глубиной. Вечная мерзлота, распространяющаяся местами до нескольких сотен метров, является реликтом ледникового периода, минувшего несколько десятков тысяч лет назад. Наблюдения в шахтах и буровых скважинах показывают постепенное увеличение температуры с глубиной. На глубине около 2800 м в Калифорнии температура достигает 400 К, в разведочных скважинах на Северном Кавказе зарегистрирована температура около 430 К на глубине 3200 м. Скорость изменения температуры с глубиной характеризуется геотермическим градиентом или обратной ему величиной геотермической ступени. Значения  $dT/dh$  изменяются от 0,1 до 0,01 К/м. На дне океана

средние значения  $dT/dh$  порядка 0,08 К/м (для Тихого океана) и 0,04 К/м (для Северной Атлантики).

Средний поток тепла из недр Земли составляет около  $5,0 \cdot 10^{-6}$  Дж/(см<sup>2</sup>·с). Диапазон изменений теплового потока на континентах — от  $1,67 \cdot 10^{-6}$  до  $12,56 \cdot 10^{-6}$  Дж/(см<sup>2</sup>·с); в океанах — от  $\pm 0,42 \cdot 10^{-6}$  до  $37,68 \cdot 10^{-6}$  Дж/(см<sup>2</sup>·с). Постоянным источником внутреннего тепла Земли являются радиоактивные элементы (табл. 44.10).

**Таблица 44.10. Среднее содержание радиоактивных элементов в главных типах осадочных пород,  $10^{-6}$  г/г, и количество выделяемой энергии [24]**

| Порода                   | <sup>235</sup> U | <sup>232</sup> Th | <sup>40</sup> K | A, $10^{-13}$<br>Дж/(см <sup>2</sup> ·с) |
|--------------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------------|
| Пески и алевролиты       | 2,3              | 5,9               | $16 \cdot 10^3$ | 11,30                                    |
| Глины и глинистые сланцы | 2,9              | 10,9              | $20 \cdot 10^3$ | 16,7                                     |
| Карбонаты                | 2,1              | 2,2               | $7 \cdot 10^3$  | 5,44                                     |
| Среднее                  | —                | —                 | —               | 12,56                                    |

Охлаждение глубинных слоев Земли в настоящее время идет медленно. Активной в термическом отношении зоной являются верхние слои Земли до глубины 100—200 км, особенно в областях распространения кислых изверженных и магматических пород.

**Тепловой баланс Земли [25].** Земля ежегодно поглощает 703 кДж/см<sup>2</sup>, из них: 469 кДж/см<sup>2</sup> — земная поверхность; 234 кДж/см<sup>2</sup> — атмосфера Земли. Потери земной поверхностью на длинноволновое эффективное излучение составляют 167 кДж/см<sup>2</sup>, потери на испарение — 247 кДж/см<sup>2</sup>, передача в атмосферу через турбулентную теплоотдачу — 54 кДж/см<sup>2</sup>.

#### 44.3. ГИДРОСФЕРА

##### Мировой океан [26]

Площадь мирового океана составляет  $361,3 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup> (70,8% поверхности Земли), объем вод  $1338,5 \cdot 10^6$  км<sup>3</sup>, средняя глубина 3705 м (табл. 44.11).

**Таблица 44.11. Главные морфометрические характеристики океанов [26]**

| Океан         | Площадь,<br>$10^6$ км <sup>2</sup> | Часть Мирового океана,<br>% | Объем,<br>$10^6$ км <sup>3</sup> | Часть Мирового океана,<br>% | Средняя глубина, м |
|---------------|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Тихий         | 178,68                             | 49,4                        | 707,1                            | 52,8                        | 3957               |
| Атлантический | 91,66                              | 25,4                        | 330,1                            | 24,7                        | 3601               |
| Индийский     | 76,17                              | 21,1                        | 284,7                            | 21,3                        | 3736               |
| Северный      | 14,79                              | 4,1                         | 16,7                             | 1,2                         | 1129               |
| Ледовитый     |                                    |                             |                                  |                             |                    |

Океаническое дно имеет три четко выраженные ступени: материковую отмель, материковый склон и ложе океана или моря. Материковая отмель (шельф, континентальное плато) является продолжением поверхности материков; занимает около 7,5% площади Мирового океана. Средняя ширина материковой отмели равна 78 км, однако у берегов Африки она практически

отсутствует, а у северных берегов Азии имеет ширину несколько сот километров.

Со стороны океана материковая отмель ограничена бровкой, глубина которой — от 20 до 500 м (средняя глубина 133 м).

Материковый склон круто опускается от бровки материковой отмели к ложу океана или моря и занимает около 15,5% площади Мирового океана. Нижняя граница его проходит на глубине 2000—4000 м, ширина изменяется от нескольких километров до нескольких сотен километров. Средний угол наклона составляет около 3,5°, максимальный достигает 40—45°.

Ложе океана или моря — это центральная, преимущественно равнинная часть дна, расположенная на глубине свыше 2000—4000 м и составляющая около 77% площади Мирового океана. При взаимодействии поверхности океана с атмосферой возникает ветровое волнение (табл. 44.12).

**Таблица 44.12. Шкала силы (степени) ветрового волнения и глубины распространения волн [26]**

| Волнение, баллы | Характеристика | Размеры волн |          |           | Глубина распространения, м |
|-----------------|----------------|--------------|----------|-----------|----------------------------|
|                 |                | Высота, м    | Длина, м | Период, с |                            |
| 0               | Отсутствует    | 0            | 0        | 0         | 0                          |
| I               | Слабое         | До 0,25      | До 5,0   | До 2,0    | До 2,6                     |
| II              | Умеренное      | 0,25—0,75    | 5—15     | 2—3       | 2,6—10,3                   |
| III             | Значительное   | 0,75—1,25    | 15—25    | 3—4       | 10,3—19,2                  |
| IV              | Значительное   | 1,25—2,0     | 25—40    | 4—5       | 19,2—33,7                  |
| V               | Сильное        | 2,0—3,5      | 40—75    | 5—7       | 33,7—69,9                  |
| VI              | Сильное        | 3,5—6,0      | 75—125   | 7—9       | 69,9—127,3                 |
| VII             | Очень сильное  | 6,0—8,5      | 125—170  | 9—11      | 127,3—182,6                |
| VIII            | Очень сильное  | 8,5—11,0     | 170—220  | 11—12     | 182,6—245,3                |
| IX              | Исключительное | >11,0        | >220     | >12       | >245,3                     |

**Таблица 44.13. Распределение запасов воды на поверхности Земли [32]**

| Запас воды      | Объем, км <sup>3</sup> | Масса, кг                      |
|-----------------|------------------------|--------------------------------|
| Океаны и моря   | $1336 \cdot 10^6$      | $1,3 \cdot 10^{21}$            |
| Полярный лед    | $3,5 \cdot 10^6$       | $3,5 \cdot 10^{18}$            |
| Озера           | $2,5 \cdot 10^5$       | $2,5 \cdot 10^{17}$            |
| Подземные озера | $2,5 \cdot 10^5$       | $2,5 \cdot 10^{17}$            |
| Реки            | $5 \cdot 10^4$         | $5 \cdot 10^{16}$              |
| Болота          | $6 \cdot 10^3$         | $6 \cdot 10^{15}$              |
| Снежный покров  | 250                    | $2,5 \cdot 10^{14}$            |
| Полный запас    | $\sim 1340 \cdot 10^6$ | $(1,8 \div 2,7) \cdot 10^{18}$ |

**Влагооборот (табл. 44.13).** Общее количество воды, выпадающей за один год в виде осадков, для всего земного шара оценивается в  $5 \cdot 10^{17}$  кг, что в 40 раз больше общего содержания воды в атмосфере. По современным данным (с погрешностью до 10%) общее количество осадков, выпадающих на поверхность Мирового океана, дает в среднем слой осадков 102 см/год,

что соответствует выпадению 370 000 км<sup>3</sup> воды. Испарение с поверхности океана составляет 113 см/год, или 407 000 км<sup>3</sup> воды, и речной сток в океаны оказывается равным 10,3 см/год, или 37 000 км<sup>3</sup>.

Для поверхности суши с учетом стока в океан получены следующие значения, см/год: осадки 70,0 (102 000 км<sup>3</sup>), испарение 44,6 (64 900 км<sup>3</sup>) и сток 25,4 (37 000 км<sup>3</sup>). На долю частей суши, не имеющих стока в океан, приходится всего около 8000 км<sup>3</sup> осадков и столько же на испарение. В целом для земного шара годовой слой осадков, равный годовому испарению, составляет 92,8 см/год (472 000 км<sup>3</sup>), причем на сушу из общего количества осадков выпадает только 22%, а на океан 78%; испарение же с поверхности суши составляет 14% общего испарения, а остальные 86% испаряются с поверхности океана.

Таблица 44.14. Средний химический состав океанической воды при  $T = 5^\circ$  и хлорности 19%

| Элемент  | Содержание, %         | Элемент  | Содержание, %                 |
|----------|-----------------------|----------|-------------------------------|
| Кислород | 85,94                 | Медь     | $6 \cdot 10^{-7}$             |
| Водород  | 10,80                 | Свинец   | $4 \cdot 10^{-7}$             |
| Хлор     | 1,898                 | Марганец | $4 \cdot 10^{-7}$             |
| Натрий   | 1,056                 | Селен    | $4 \cdot 10^{-7}$             |
| Магний   | $1,272 \cdot 10^{-1}$ | Цезий    | $2 \cdot 10^{-7}$             |
| Сера     | $8,84 \cdot 10^{-2}$  | Уран     | $1,5 \cdot 10^{-7}$           |
| Кальций  | $4,00 \cdot 10^{-2}$  | Молибден | $5 \cdot 10^{-8}$             |
| Калий    | $3,80 \cdot 10^{-2}$  | Галлий   | $5 \cdot 10^{-8}$             |
| Бром     | $6,5 \cdot 10^{-3}$   | Торий    | $< 5 \cdot 10^{-8}$           |
| Углерод  | $3,0 \cdot 10^{-3}$   | Никель   | $3 \cdot 10^{-8}$             |
| Азот     | $1,7 \cdot 10^{-3}$   | Ванадий  | $3 \cdot 10^{-8}$             |
| Стронций | $1,33 \cdot 10^{-3}$  | Церий    | $3 \cdot 10^{-8}$             |
| Бор      | $4,6 \cdot 10^{-4}$   | Иттрий   | $3 \cdot 10^{-8}$             |
| Кремний  | $> 2 \cdot 10^{-4}$   | Лантан   | $3 \cdot 10^{-8}$             |
| Фтор     | $1,3 \cdot 10^{-4}$   | Криптон  | $2,8 \cdot 10^{-8}$           |
| Аргон    | $6,1 \cdot 10^{-5}$   | Висмут   | $2 \cdot 10^{-8}$             |
| Рубидий  | $2 \cdot 10^{-5}$     | Неон     | $1,1 \cdot 10^{-8}$           |
| Литий    | $1 \cdot 10^{-5}$     | Кобальт  | $10^{-8}$                     |
| Фосфор   | $1 \cdot 10^{-5}$     | Серебро  | $10^{-8}$                     |
| Иод      | $5 \cdot 10^{-6}$     | Ксенон   | $9,4 \cdot 10^{-9}$           |
| Барий    | $5 \cdot 10^{-6}$     | Скандий  | $4 \cdot 10^{-9}$             |
| Мышьяк   | $1,5 \cdot 10^{-6}$   | Ртуть    | $3 \cdot 10^{-9}$             |
| Цинк     | $1 \cdot 10^{-6}$     | Гелий    | $5,2 \cdot 10^{-10}$          |
| Алюминий | $1 \cdot 10^{-6}$     | Золото   | $5 \cdot 10^{-10}$            |
| Железо   | $1 \cdot 10^{-6}$     | Радий    | $(0,2 \div 3) \cdot 10^{-10}$ |

Таблица 44.15. Важнейшие вещества, растворенные в морской, озерной и речной воде

| Вещества, растворенные в морской воде |                                    |                                  | Вещества, растворенные в озерной и речной воде |                                    |                                  |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Ионы                                  | Концентрация, г/10 <sup>3</sup> кг | Общая масса, 10 <sup>15</sup> кг | Ионы                                           | Концентрация, г/10 <sup>3</sup> кг | Общая масса, 10 <sup>12</sup> кг |
| Cl <sup>-</sup>                       | 19 360                             | 30 976                           | CO <sub>2</sub>                                | 51,2                               | 1178                             |
| Na <sup>+</sup>                       | 10 770                             | 17 232                           | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>                  | 29,8                               | 680                              |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>         | 2701                               | 4 321                            | CO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                  | 17,7                               | 407                              |
| Mg <sup>2+</sup>                      | 1298                               | 2 077                            | SiO <sub>2</sub>                               | 17,1                               | 393                              |
| Ca <sup>2+</sup>                      | 408                                | 653                              | Cl <sup>-</sup>                                | 8,3                                | 191                              |
| K <sup>+</sup>                        | 387                                | 619                              | Na <sup>+</sup>                                | 8,4                                | 193                              |
| HCO <sup>-</sup>                      | 128                                | 205                              | Mg <sup>2+</sup>                               | 5,0                                | 155                              |
| Br <sup>-</sup>                       | 66                                 | 106                              | (Al, Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 4,0                                | 92                               |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>        | 27                                 | 43                               | K <sup>+</sup>                                 | 3,1                                | 71                               |
| Si <sup>2+</sup>                      | 14                                 | 22                               | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                   | 1,3                                | 30                               |

Большая часть воды (90%) содержится в нижнем слое атмосферы (до 8—10 км) и составляет 0,3—0,4% массы атмосферного воздуха в этом слое. Основная часть воды в атмосфере находится в парообразном состоянии (около 95%), на долю облачных частиц (капель воды и кристаллов льда) приходится менее 5% массы воды, содержащейся в атмосфере.

Таблица 44.16. Растворимость газов в морской и пресной воде в зависимости от температуры, см<sup>3</sup>/л

| Газ             | В пресной воде при температуре, °C |       |       |       | В морской воде ( $S = 35\text{‰}$ ) при температуре, °C |       |       |       |
|-----------------|------------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                 | 0                                  | 10    | 20    | 30    | 0                                                       | 10    | 20    | 30    |
| N <sub>2</sub>  | 18,18                              | 14,60 | 12,24 | 10,98 | 14,04                                                   | 11,72 | 10,18 | 9,08  |
| O <sub>2</sub>  | 10,29                              | 8,02  | 6,57  | 5,57  | 8,04                                                    | 6,41  | 5,35  | 4,50  |
| Ar              | 0,54                               | 0,42  | 0,35  | 0,30  | 0,41                                                    | 0,31  | 0,25  | 0,21  |
| CO <sub>2</sub> | 0,52                               | 0,36  | 0,26  | 0,20  | 0,44                                                    | 0,31  | 0,23  | 0,18  |
| Всего           | 29,45                              | 23,40 | 19,42 | 17,05 | 22,93                                                   | 18,75 | 16,01 | 13,97 |

Таблица 44.17. Феноменологические коэффициенты воды при атмосферном давлении

| Название                                                                     | Чистая вода            |                        | Океаническая вода ( $S = 35\text{‰}$ ) |                        |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------|
|                                                                              | 0°C                    | 20°C                   | 0°C                                    | 20°C                   |
| Динамическая вязкость $\nu$ , г·см <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>            | $1,787 \times 10^{-2}$ | $1,002 \times 10^{-2}$ | $1,877 \times 10^{-2}$                 | $1,075 \times 10^{-2}$ |
| Теплопроводность $\lambda$ , Вт·см <sup>-1</sup> ·К                          | $5,66 \times 10^{-3}$  | $5,99 \times 10^{-3}$  | $5,63 \times 10^{-3}$                  | $5,96 \times 10^{-3}$  |
| Кинематическая вязкость $\nu$ , см <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>             | $1,787 \times 10^{-2}$ | $1,004 \times 10^{-2}$ | $1,826 \times 10^{-2}$                 | $1,049 \times 10^{-2}$ |
| Температуропроводность $\lambda/c_p \rho$ , см <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> | $1,34 \times 10^{-3}$  | $1,43 \times 10^{-3}$  | $1,39 \times 10^{-3}$                  | $1,49 \times 10^{-3}$  |
| Коэффициент диффузии $D$ , см <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> (NaCl)           | $0,74 \times 10^{-5}$  | $1,41 \times 10^{-5}$  | $0,68 \times 10^{-5}$                  | $1,29 \times 10^{-5}$  |
| Число Прандтля $\nu/\lambda/c_p \rho$                                        | 13,3                   | 7,0                    | 13,1                                   | 7,0                    |

Состав и свойства вод [27] (табл. 44.14—44.17)

Вследствие большой ионизирующей способности воды растворенные в ней соли оказываются в ионно-дисперсной форме. Относительное количество растворенных веществ в 1 л морской воды называется солёностью, выражается в промиллях и обозначается  $S$ , ‰. Существует связь между  $S$ , ‰, и хлорностью (содержанием хлора в морской воде), ‰:

$$S = 0,03 + 1,805 \text{ Cl.}$$

Средняя солёность морской воды  $S = 34,85 \text{‰}$ , средняя хлорность  $\text{Cl} = 19,37 \text{‰}$ .

### Физические свойства океанической воды и льда [28]

Плотность  $\rho$  и электропроводность морской воды (табл. 44.18, 44.19) зависят от температуры, солёности и давления. Значения плотности  $\rho$  в Мировом океане изменяются от 1,0757 до 0,9960 г/см<sup>3</sup>, поэтому для

Таблица 44.18. Условная плотность морской воды  $\sigma_t$ , г/см<sup>3</sup>, в зависимости от температуры и солёности  $S$

| $t, ^\circ\text{C}$ | $S, \text{‰}$ |       |       |
|---------------------|---------------|-------|-------|
|                     | 32            | 35    | 38    |
| 0                   | 25,71         | 28,13 | —     |
| 14                  | 23,90         | 26,21 | —     |
| 28                  | 20,17         | 22,41 | 24,67 |

Таблица 44.19. Удельная электропроводность  $\lambda$  морской воды в зависимости от температуры и солёности,  $10^8$  Ом/м

| $t, ^\circ\text{C}$ | $S, \text{‰}$ |      |      |      |
|---------------------|---------------|------|------|------|
|                     | 10            | 20   | 30   | 40   |
| 0                   | 923           | 1747 | 2528 | 3276 |
| 15                  | 1378          | 2594 | 3740 | 4834 |
| 25                  | 1712          | 3214 | 4626 | 5967 |

удобства расчетов вводится условная плотность:

$$\sigma_t(t, S, P_a) = \left\{ \frac{\rho_t(t, S, P_a)}{\rho(4, 0, P_a)} - 1 \right\} \cdot 10^3,$$

где  $\rho(4, 0, P_a) = 1$  г/см<sup>3</sup> — плотность пресной воды при температуре 4 °С и атмосферном давлении  $P_a$ .

Зависимость  $\sigma$ , г/см<sup>3</sup>, от солёности  $S$ , ‰, определяется формулой

$$\sigma = (-0,093 + 0,8149S - 0,000482S^2 + 0,0000068S^3),$$

где

$$\sigma = (\rho_0 - 1) \cdot 10^3; \rho_0 = \rho(t = 0^\circ\text{C}).$$

Характерные для поверхности моря значения плотности, зависящие от температуры, находятся в пределах от 0,9960 до 1,0283 г/см<sup>3</sup>.

Удельная теплоемкость океанической воды близка к 4,18 Дж/(г·К) и уменьшается при увеличении солёности, температуры и давления. При атмосферном давлении,  $t = 0^\circ\text{C}$  и  $S = 0\text{‰}$  она составляет 4,22 Дж/(г·К), а при  $t = 30^\circ\text{C}$  и  $S = 40\text{‰}$  равна 3,87 Дж/(г·К). Удельная теплоемкость воды при  $t = 0^\circ\text{C}$  и  $S = 34,85\text{‰}$  убывает от 3,93 Дж/(г·К) на поверхности до 3,89 Дж/(г·К) на глубине 1 км и до 3,64 Дж/(г·К) на глубине 10 км.

**Теплопроводность.** Решающую роль в распространении тепла в океане играет турбулентная теплопроводность при фрикционном и конвективном перемешивании вод.

Молекулярная теплопроводность воды очень невелика, например при  $t = 17,5^\circ\text{C}$ :

|                                                               |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| $S, \text{‰}$                                                 | 0    | 10   | 20   | 30   |
| $10^3 \lambda, \text{ Дж/(см} \cdot \text{с} \cdot \text{К)}$ | 5,81 | 5,69 | 5,65 | 5,57 |

Температура замерзания  $\tau$  океанической воды понижается при увеличении солёности  $S$ , ‰:

$$\tau = -0,003^\circ - 0,0527^\circ S - 0,0000004^\circ S^2.$$

Температура замерзания воды, имеющей среднюю океаническую солёность ( $S = 35\text{‰}$ ), равна  $-1,9^\circ\text{C}$ , что гораздо ниже не только средней температуры поверхностного слоя воды, но и средней температуры ( $3,8^\circ\text{C}$ ) всей водной толщ.

Вязкость воды складывается из молекулярной и турбулентной компонент. Молекулярная вязкость дистиллированной воды зависит от температуры:

|                                        |       |       |       |       |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $t, ^\circ\text{C}$                    | 0     | 10    | 20    | 30    |
| $\eta, 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$ | 1,797 | 1,307 | 1,004 | 0,803 |

При  $S = 40\text{‰}$  значения  $\eta$  на 6—9% выше приведенных.

Турбулентная вязкость во много раз превосходит молекулярную и является главной причиной фрикционного перемешивания вод.

**Поверхностное натяжение**  $\alpha$  океанической воды уменьшается с ростом температуры и увеличивается с увеличением солёности  $S$  и хлорности  $Cl$ . Зависимость  $\alpha$  от  $t, ^\circ\text{C}$  и  $Cl, \text{‰}$ , имеет вид

$$\alpha = (75,611 - 0,144 t + 0,0399 Cl).$$

## Физические свойства морского льда (табл. 44.20, 44.21) [29]

Морская вода не имеет определенной точки замерзания. При общей солёности воды 33‰ образование льда начинается при  $-1,8^\circ\text{C}$ . Но между кристаллами льда остается небольшое количество морской воды, в которой отдельные соли выкристаллизовываются при более низких температурах, и только при  $-5,5^\circ\text{C}$  образовавшийся рассол полностью застывает. Солёность и количество находящегося во льду воздуха определяют плотность морского льда.

Таблица 44.20. Плотность морского льда в зависимости от солёности и содержания воздуха

| Объемное содержание воздуха, % | $S, \text{‰}$ |       |       |       |
|--------------------------------|---------------|-------|-------|-------|
|                                | 0             | 10    | 20    | 30    |
| 0                              | 0,918         | 0,925 | 0,934 | 0,942 |
| 3                              | 0,890         | 0,898 | 0,906 | 0,914 |
| 6                              | 0,863         | 0,871 | 0,879 | 0,887 |
| 9                              | 0,835         | 0,843 | 0,851 | 0,859 |

Таблица 44.21. Зависимость температуры замерзания  $\tau, ^\circ\text{C}$ , и температуры наибольшей плотности  $\theta, ^\circ\text{C}$ , от солёности  $S, \text{‰}$ , океанической воды [30]

|                          |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| $S, \text{‰}$            | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   |
| $\tau, ^\circ\text{C}$   | 0    | -0,3 | -0,5 | -0,8 | -1,1 |
| $\theta, ^\circ\text{C}$ | 3,98 | 2,9  | 1,9  | 0,8  | 0,3  |

Продолжение табл. 44.21

|                          |        |       |      |      |      |
|--------------------------|--------|-------|------|------|------|
| $S, \text{‰}$            | 24,695 | 25    | 30   | 35   | 40   |
| $\tau, ^\circ\text{C}$   | -1,332 | -1,35 | -1,6 | -1,9 | -2,2 |
| $\theta, ^\circ\text{C}$ | -1,332 | -1,4  | -2,5 | -3,5 | -4,5 |

Оптические свойства океанической воды табл. (44.22—44.27) [28]

Т а б л и ц а 44.22. Оптические свойства чистой воды при  $t = 20^\circ \text{C}$

| $\lambda$ ,<br>нм | $n$   | $\sigma(90^\circ)$ ,<br>$10^{-8} \text{ м}^{-1}$ | $\sigma$ ,<br>$10^{-8} \text{ м}^{-1}$ | $\epsilon$ ,<br>$10^{-3} \text{ м}$ | $\chi$ ,<br>$10^{-3} \text{ м}^{-1}$ | $\Delta = \sigma/\epsilon$ | $\lambda$ ,<br>нм | $n$   | $\sigma(90^\circ)$ ,<br>$10^{-8} \text{ м}^{-1}$ | $\sigma$ ,<br>$10^{-8} \text{ м}^{-1}$ | $\epsilon$ ,<br>$10^{-3} \text{ м}^{-1}$ | $\chi$ ,<br>$10^{-3} \text{ м}^{-1}$ | $\Delta = \sigma/\epsilon$ |
|-------------------|-------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------|-------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 250               | 1,377 | 2,00                                             | 32,0                                   | 220                                 | 190                                  | 0,15                       | 550               | 1,334 | 0,082                                            | 1,3                                    | 36                                       | 35                                   | 0,036                      |
| 300               | 1,359 | 0,96                                             | 15,0                                   | 55                                  | 40                                   | 0,27                       | 560               | 1,334 | 0,076                                            | 1,2                                    | 40                                       | 39                                   | 0,030                      |
| 320               | 1,354 | 0,74                                             | 12,0                                   | 32                                  | 20                                   | 0,38                       | 580               | 1,333 | 0,066                                            | 1,1                                    | 75                                       | 74                                   | 0,015                      |
| 350               | 1,349 | 0,51                                             | 8,2                                    | 20                                  | 12                                   | 0,41                       | 600               | 1,333 | 0,058                                            | 0,93                                   | 200                                      | 200                                  | 0,0046                     |
| 400               | 1,343 | 0,30                                             | 4,8                                    | 11                                  | 6                                    | 0,44                       | 620               | 1,332 | 0,051                                            | 0,82                                   | 240                                      | 240                                  | 0,0034                     |
| 420               | 1,342 | 0,25                                             | 4,0                                    | 9                                   | 5                                    | 0,44                       | 640               | 1,332 | 0,045                                            | 0,72                                   | 270                                      | 270                                  | 0,0027                     |
| 440               | 1,340 | 0,20                                             | 3,2                                    | 7                                   | 4                                    | 0,46                       | 660               | 1,331 | 0,040                                            | 0,64                                   | 310                                      | 310                                  | 0,0021                     |
| 460               | 1,339 | 0,17                                             | 2,7                                    | 5                                   | 2                                    | 0,54                       | 680               | 1,331 | 0,035                                            | 0,56                                   | 380                                      | 380                                  | 0,0015                     |
| 480               | 1,337 | 0,14                                             | 2,2                                    | 5                                   | 3                                    | 0,44                       | 700               | 1,330 | 0,031                                            | 0,50                                   | 600                                      | 600                                  | 0,0008                     |
| 500               | 1,336 | 0,12                                             | 1,9                                    | 8                                   | 6                                    | 0,24                       | 740               | 1,329 | 0,025                                            | 0,40                                   | 2250                                     | 2250                                 | 0,0002                     |
| 520               | 1,335 | 0,10                                             | 1,6                                    | 16                                  | 14                                   | 0,10                       | 750               | 1,329 | 0,024                                            | 0,39                                   | 2620                                     | 2620                                 | 0,0001                     |
| 530               | 1,335 | 0,095                                            | 1,5                                    | 23                                  | 22                                   | 0,065                      | 760               | 1,329 | 0,022                                            | 0,35                                   | 2560                                     | 2560                                 | 0,0001                     |
| 540               | 1,335 | 0,088                                            | 1,4                                    | 30                                  | 29                                   | 0,047                      | 800               | 1,328 | 0,018                                            | 0,29                                   | 2020                                     | 2020                                 | 0,0001                     |

П р и м е ч а н и е.  $n$  — показатель преломления;  $\sigma$  — показатель рассеяния излучения;  $\gamma$  — угол рассеяния;  $\epsilon$  — показатель ослабления излучения;  $\chi$  — показатель поглощения излучения;  $\Delta$  — прозрачность водной среды;

$$\sigma = -\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi_\sigma}{dl}; \quad \epsilon = -\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi_\epsilon}{dl}; \quad \chi = -\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi_\chi}{dl},$$

где  $\Phi$  — поток параллельного монохроматического излучения;  $dl$  — толщина облучаемого слоя объемом  $dV$ ;  $d\Phi_\sigma$ ,  $d\Phi_\epsilon$ ,  $d\Phi_\chi$  — элементарные потоки излучения — соответственно рассеянный, ослабленный и поглощенный при прохождении  $dV$ .

Т а б л и ц а 44.23. Спектральная плотность облученности  $E_\lambda$ ,  $10^{-5} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{нм})$ , поверхности моря при высоте Солнца  $h = 30^\circ$

| $\lambda$ , нм | $E_\lambda$ | $\lambda$ , нм | $E_\lambda$ | $\lambda$ , нм | $E_\lambda$ | $\lambda$ , нм | $E_\lambda$ |
|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| 400            | 5,23        | 525            | 7,87        | 625            | 7,16        | 725            | 5,98        |
| 425            | 5,85        | 550            | 7,19        | 650            | 6,89        | 750            | 5,70        |
| 450            | 7,41        | 575            | 7,72        | 675            | 6,58        | 775            | 5,45        |
| 475            | 8,15        | 600            | 7,53        | 700            | 6,26        | 800            | 5,18        |
| 500            | 8,27        |                |             |                |             |                |             |

Т а б л и ц а 44.24. Спектральные показатели поглощения света океанической водой  $\kappa$ ,  $\text{м}^{-1}$

| Место измерения                          | Глубина,<br>м | Длина волны, нм |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------|---------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                          |               | 390             | 410   | 430   | 450   | 470   | 490   | 510   | 530   | 550   | 570   |
| Саргассово море                          | 0             | 0,041           | 0,034 | 0,025 | 0,016 | 0,014 | 0,018 | 0,023 | 0,039 | 0,050 | 0,067 |
| Карибское море                           | 0             | 0,20            | 0,090 | 0,034 | 0,023 | 0,016 | 0,014 | 0,014 | 0,023 | 0,032 | 0,055 |
| Балтийское море<br>(Готландская впадина) | 0             | 0,71            | 0,48  | 0,34  | 0,23  | 0,15  | 0,090 | 0,064 | 0,064 | 0,032 | 0,055 |
| Тихий океан                              | 20            | 0,053           | 0,090 | 0,12  | 0,090 | 0,060 | 0,039 | 0,028 | 0,032 | 0,037 | 0,058 |
| Галапагосские острова                    | 200           | 0,067           | 0,062 | 0,044 | 0,034 | 0,025 | 0,014 | 0,014 | 0,028 | 0,032 | 0,058 |
| (впадина Тонга)                          | 10 000        | 0,058           | 0,037 | 0,023 | 0,012 | 0,009 | 0,009 | 0,016 | 0,025 | 0,032 | 0,055 |
| Индийский океан                          | 0             | 0,062           | 0,041 | 0,030 | 0,032 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,030 | 0,039 | 0,055 |

П р и м е ч а н и е. Для  $\lambda > 570 \text{ нм}$  значения  $\kappa$  практически не отличаются от значений  $\kappa$  для чистой воды (см. табл. 44.23).

Т а б л и ц а 44.25. Показатель полного молекулярного рассеяния  $\sigma_M$ ,  $10^{-3} \text{ м}^{-1}$ , океанической воды в зависимости от  $\lambda$ , нм

| $\lambda$ | $\sigma_M$ | $\lambda$ | $\sigma_M$ | $\lambda$ | $\sigma_M$ | $\lambda$ | $\sigma_M$ | $\lambda$ | $\sigma_M$ |
|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| 250       | 4,0        | 420       | 4,9        | 520       | 2,0        | 580       | 1,4        | 680       | 6,9        |
| 300       | 1,9        | 440       | 4,0        | 530       | 1,9        | 600       | 1,15       | 700       | 6,2        |
| 320       | 1,5        | 460       | 3,3        | 540       | 1,7        | 620       | 1,00       | 740       | 4,9        |
| 360       | 1,0        | 480       | 2,7        | 550       | 1,6        | 640       | 0,89       | 760       | 4,3        |
| 400       | 0,59       | 500       | 2,4        | 560       | 1,5        | 660       | 0,79       | 800       | 3,6        |

Т а б л и ц а 44.26. Показатель полного молекулярного рассеяния

$\sigma_M$  ( $\gamma$ ) для  $\lambda = 546 \text{ нм}$

|                                                         |        |         |         |         |
|---------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|
| $\gamma$ , град                                         | 0; 180 | 10; 170 | 20; 160 | 30; 150 |
| $\sigma_M$ , $10^4 \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ | 1,9    | 1,9     | 1,8     | 1,7     |

Продолжение табл. 44.26

|                                                         |         |         |         |     |
|---------------------------------------------------------|---------|---------|---------|-----|
| $\gamma$ , град                                         | 45; 135 | 60; 120 | 75; 105 | 90  |
| $\sigma_M$ , $10^4 \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ | 1,5     | 1,25    | 1,1     | 1,0 |

Т а б л и ц а 44.27. Коэффициент преломления света в океанической воде в зависимости от длины волны  $\lambda$  и солёности  $S$

| $\lambda$ , нм | $S$ , ‰ |         |         |         |
|----------------|---------|---------|---------|---------|
|                | 0       | 10      | 20      | 30      |
| 667,8          | 1,33087 | 1,33271 | 1,33452 | 1,33726 |
| 587,6          | 1,33305 | 1,33491 | 1,33675 | 1,33951 |
| 501,6          | 1,33635 | 1,33824 | 1,34011 | 1,34293 |
| 447,2          | 1,33945 | 1,34138 | 1,34329 | 1,34616 |

### Радиоактивность океанической воды (табл. 44.28—44.29) [28]

Т а б л и ц а 44.28. Содержание естественных радионуклидов в верхних слоях океанической воды (5—100 м)

| Радионуклид       | Концентрация, $\text{г/см}^{-3}$ | Удельная радиоактивность, $\text{Бк} \cdot \text{см}^{-3}$ | Общее количество в океане, $10^9 \text{ кг}$ | Общая активность в океане, $3,7 \cdot 10^7 \text{ Бк}$ |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $^{40}\text{K}$   | $4,5 \cdot 10^{-8}$              | $1,2 \cdot 10^{-2}$                                        | 63 000                                       | 460 000                                                |
| $^{87}\text{Rb}$  | $8,4 \cdot 10^{-8}$              | $2,2 \cdot 10^{-4}$                                        | 118 000                                      | 8400                                                   |
| $^{238}\text{U}$  | $2,0 \cdot 10^{-9}$              | $1,0 \cdot 10^{-4}$                                        | 2800                                         | 3800                                                   |
| $^{235}\text{U}$  | $1,5 \cdot 10^{-11}$             | $3,0 \cdot 10^{-6}$                                        | 21                                           | 110                                                    |
| $^{232}\text{Th}$ | $10^{-11}$                       | $1,0 \cdot 10^{-7}$                                        | 14                                           | 8                                                      |
| $^{226}\text{Ra}$ | $3,0 \cdot 10^{-16}$             | $3,0 \cdot 10^{-5}$                                        | $4,2 \cdot 10^{-4}$                          | 1100                                                   |

### Скорость звука в океане [30]

Наиболее простой для вычисления  $c$ , м/с, в зависимости от  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , и  $S$ , ‰, является формула

$$c = 1450 - 4,206 t - 0,036 t^2 + 1,137 S - 35.$$

Погрешность расчета минимальна при  $t = 10^{\circ}\text{C}$  и не превышает 1,5 м/с. При увеличении  $t$ ,  $S$  и глубины

Т а б л и ц а 44.29. Искусственная радиоактивность в океане ( $\gamma$ -излучатели)

| Радионуклид                         | Период полураспада, годы | Энергия, МэВ | Диапазон удельной активности, $\text{Бк} \cdot \text{см}^{-3}$ |                     |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|
|                                     |                          |              | Открытый океан                                                 | Места сбросов       |
| $^{137}\text{Cs}$                   | 30                       | 0,67         | $5 \cdot 10^{-7} - 10^{-5}$                                    | $10^{-5} - 10^{-2}$ |
| $^{60}\text{Co}$                    | 5,3                      | 1,17—1,33    | —                                                              | $10^{-7} - 10^{-4}$ |
| $^{103}\text{Ru} + ^{106}\text{Ru}$ | 1,0                      | 0,51         | $5 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$                            | $10^{-5} - 10^{-2}$ |
| $^{141}\text{Cl} + ^{144}\text{Cl}$ | 0,8                      | 0,08—0,15    | $5 \cdot 10^{-7} - 10^{-5}$                                    | —                   |
| $^{51}\text{Cr}$                    | 0,1                      | 0,32         | —                                                              | $10^{-4} - 10^{-1}$ |
| $^{66}\text{Zn}$                    | 0,7                      | 1,2          | —                                                              | $10^{-5} - 10^{-2}$ |
| $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$   | 0,2                      | 0,75         | $10^{-6} - 10^{-5}$                                            | —                   |

скорость звука возрастает. При увеличении  $S$  на 1‰ или глубины на 100 м скорость звука повышается на 1,2 и 1,6 м/с соответственно.

Приращение скорости звука  $\Delta c$  при изменении  $t$  на  $1^{\circ}\text{C}$  зависит от температуры:

|                          |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $t$ , $^{\circ}\text{C}$ | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  |
| $\Delta c$ , м/с         | 4,1 | 3,6 | 3,2 | 2,8 | 2,4 | 2,1 |

Номограммы значений скорости звука в морской воде приведены в [31].

Т а б л и ц а 44.30. Нагревание слоя воды толщиной 1 м на различной глубине при поглощении  $4186,6 \text{ Дж/см}^2$

| Залегание слоя, м | Нагрев воды, $^{\circ}\text{C}$ |                   |
|-------------------|---------------------------------|-------------------|
|                   | чистой океанической             | мутной прибрежной |
| 0—1               | 6,24                            | 7,72              |
| 1—2               | 0,610                           | 0,960             |
| 5—6               | 0,236                           | 0,120             |
| 10—11             | 0,104                           | 0,014             |
| 20—21             | 0,040                           | 0,000             |

В океане под гомогенным поверхностным слоем температура с возрастанием глубины сильно понижается (табл. 44.30), скорость звука также уменьшается, однако одновременное увеличение давления влечет за собой некоторое повышение скорости звука. В зависимости от стратификации температуры и солёности на глубине 700—1300 м наблюдается минимум скорости звука. Отчетливые минимумы скорости звука отсутствуют там, где термическая стратификация незначительна.

## 44.4. АТМОСФЕРА

### Строение атмосферы [32]

Атмосфера не является однородной. Особенно резко ее свойства изменяются по вертикали. По составу, температурному режиму, электрическим характеристикам атмосфера в вертикальном направлении может быть разделена на ряд слоев. Особенно отчетливо различия в свойствах этих слоев проявляются в распределении температуры.

Прилегающий к Земле слой — тропосфера — характеризуется уменьшением температуры с высотой (порядка  $6 \text{ К/км}$ ) и кончается тропопаузой на высоте 7 км на полюсе и 17 км на экваторе. Выше лежит стратосфера, где температура возрастает приблизительно от 200 К в тропопаузе до 280 К в стратосфере (на высоте

те 50 км). Далее следует мезосфера, где температура уменьшается с высотой, достигая 170—180 К на высоте около 85 км (мезопауза).

Эти три слоя: тропосфера, стратосфера и мезосфера, — характеризуются неизменным газовым составом и носят общее название гомосферы.

Начиная с 85 км температура атмосферы вновь возрастает вследствие поглощения ультрафиолетового излучения Солнца. Средний градиент температуры равен 20 К/км до высоты 150 км, а далее рост постепенно замедляется и заканчивается на высоте 300 км. Эта область атмосферы называется термосферой и заканчивается термопаузой, которая находится днем на высоте 350—450 км, а ночью опускается до высоты 200—250 км. Термосфера и лежащий над ней обширный слой метасферы носят общее название гетеросферы. Вследствие этого разделения на высоте около 750 км преобладает атомарный кислород, а на высоте 1500 км — гелий.

Разделение газов заканчивается на высоте несколько тысяч километров переходом к водородному составу атмосферы. Чтобы выделить область, где столкновения между молекулами не мешают их вылету за пределы земной атмосферы, вводят термин «экзосфера». Экзосфера лежит выше 700 км.

На высоте до 200 км по характеру изменения температуры атмосфера делится на 11 слоев. Общим свойством всех слоев является линейность изменения молекулярной температуры  $T_m$ ,  $K$ , с геопотенциальной высотой  $\Phi$ . Геопотенциальная  $\Phi$  и геометрическая  $Z$  высоты связаны соотношением  $\Phi = rZ/(r+Z)$ , где  $r$  — средний радиус Земли.

Молекулярная температура  $T_m$  связана с кинетической  $T_0$  зависимостью

$$T_m = T_0 M_0 / M_z,$$

где  $M_0$  и  $M_z$  — молекулярная масса воздуха на уровне моря и на рассматриваемой высоте соответственно. Для расчетов приняты следующие значения физических характеристик атмосферы на уровне моря и физических констант [32]:

барометрическое давление на географической широте  $\varphi = 45^\circ 32' 40''$  при температуре ртути 273,15 К и средней ртути 13595,1 кг/м<sup>3</sup>

$$P_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па (760 мм рт. ст.);}$$

температура  $t_0 = 15^\circ \text{C} = 288,15 \text{ К;}$

газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(К·моль):

универсальная . . . . . 8,31441  
удельная . . . . . 0,287055

динамическая вязкость воздуха при  $T = 273 \text{ К}$

$$\mu_0 = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ кг·с/м}^2 = 1,7162 \cdot 10^{-5} \text{ Па·с.}$$

ускорение свободного падения  $g_0 = 980,665 \text{ см/с}^2$ .

**Барометрическая формула.** Для определения разности высот  $Z_2 - Z_1$  между двумя точками, давление в которых равно  $P_2$  и  $P_1$ , можно воспользоваться барометрической формулой Лапласа

$$Z_2 - Z_1 = 18\,400 (1 + 0,00366 \bar{t}) (1 + 0,378 (\bar{e}/P)) \times \\ \times (1 + 0,00264 \cos 2\varphi) (1 + 3,14 \cdot 10^{-7} \bar{h}) \lg (P_1/P_2),$$

где  $\bar{t}$ ,  $\bar{h}$ ,  $\bar{e}/P$  — средние значения температуры, высоты над уровнем моря и отношения парциального давления  $e$  водяного пара к атмосферному  $P$ . Если пренебречь зависимостью ускорения свободного падения от широ-

ты и высоты и считать воздух сухим, можно воспользоваться упрощенной барометрической формулой:

$$Z_2 - Z_1 = 18\,400 (1 + 0,00366 \bar{t}) \lg (P_1/P_2).$$

По многочисленным данным, полученным прямыми и косвенными методами, определены характеристики некоторой средней, или стандартной, атмосферы (табл. 44.31 — 44.34) [33].

Т а б л и ц а 44.31. Состав атмосферы и молярная масса

| Газ                       | Объемное содержание, %                                             | Молярная масса $M$ , кг/кмоль |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Азот $N_2$                | 78,084000                                                          | 28,01340                      |
| Кислород $O_2$            | 20,947600                                                          | 31,99880                      |
| Аргон Ar                  | 0,934000                                                           | 39,94800                      |
| Углекислый газ $CO_2$     | 0,031400*1                                                         | 44,00995                      |
| Неон Ne                   | $1,818 \cdot 10^{-6}$                                              | 20,18300                      |
| Гелий He                  | $524,0 \cdot 10^{-6}$                                              | 4,00260                       |
| Криптон Kr                | $114,0 \cdot 10^{-6}$                                              | 88,00000                      |
| Ксенон Xe                 | $8,7 \cdot 10^{-6}$                                                | 131,30000                     |
| Водород $H_2$             | $50,0 \cdot 10^{-6}$                                               | 2,01594                       |
| Оксид азота $N_2O$        | $50,0 \cdot 10^{-6}$ *1                                            | 44,01280                      |
| Метан $CH_4$              | $200 \cdot 10^{-6}$                                                | 16,04303                      |
| Озон $O_3$                | Летом до $7,0 \cdot 10^{-6}$ *1<br>Зимой до $2,0 \cdot 10^{-6}$ *1 | 47,99820                      |
| Сернистый ангидрид $SO_2$ | До $100 \cdot 10^{-6}$ *1                                          | 64,06280                      |
| Перекись азота $NO_2$     | До $2,0 \cdot 10^{-6}$ *1                                          | 46,00550                      |
| Иод $I_2$                 | До $1,0 \cdot 10^{-6}$ *1                                          | 253,80880                     |
| Воздух                    | 100                                                                | 28,96442*2                    |

\*1 Содержание газа может подвергаться существенным изменениям в зависимости от места и времени измерения.

\*2 Рассчитано по уравнению состояния идеального газа.

Т а б л и ц а 44.32. Параметры атмосферы на среднем уровне моря

| Параметр                                           | Обозначение | Значение               |
|----------------------------------------------------|-------------|------------------------|
| Скорость звука, м/с                                | $a_c$       | 340,294                |
| Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>     | $g_c$       | 9,80665                |
| Масштаб высоты по давлению, м                      | $H_{Pc}$    | 8434,5                 |
| Средняя длина свободного пробега частиц воздуха, м | $l_c$       | $66,328 \cdot 10^{-9}$ |
| Молярная масса, кг/кмоль                           | $M_c$       | 28,964420              |
| Концентрация частиц, м <sup>-3</sup>               | $n_c$       | $25,471 \cdot 10^{24}$ |
| Давление, Па                                       | $P_c$       | 101325,0               |
| Температура Кельвина, К                            | $T_c$       | 288,15                 |
| Средняя скорость частиц воздуха, м/с               | $v_c$       | 458,94                 |
| Удельный вес, Н/м <sup>3</sup>                     | $\gamma_c$  | 12,013                 |
| Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с         | $\nu_c$     | $14,607 \cdot 10^{-6}$ |
| Динамическая вязкость, Па·с                        | $\mu_c$     | $17,894 \cdot 10^{-6}$ |
| Теплопроводность, Вт/(м·К)                         | $\lambda_c$ | $25,343 \cdot 10^{-3}$ |
| Частота соударений частиц воздуха, с <sup>-1</sup> | $\omega_c$  | $6,9193 \cdot 10^9$    |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                       | $\rho_c$    | 1,2250                 |



Т а б л и ц а 44.33. Распределение молекулярной массы и температуры по высоте

| Высота, км | Молекулярная масса, а. е. м. | Температура, К |              | Градиент молекулярной температуры, К/м |
|------------|------------------------------|----------------|--------------|----------------------------------------|
|            |                              | молекулярная   | кинетическая |                                        |
| 0          | 28,966                       | 288,15         | 288,15       | -0,00651122                            |
| 11         | 28,966                       | 216,66         | 216,66       | 0                                      |
| 25         | 28,966                       | 216,66         | 216,66       | 0,00276098                             |
| 46         | 28,966                       | 247,00         | 247,00       | 0                                      |
| 54         | 28,966                       | 274,00         | 274,00       | -0,00349544                            |
| 80         | 28,966                       | 185,00         | 185,00       | 0                                      |
| 95         | 28,966                       | 185,00         | 185,00       | 0,00500000                             |
| 110        | 28,934                       | 257,64         | 257,36       | 0,00801741                             |
| 120        | 28,727                       | 335,00         | 332,24       | 0,02345357                             |
| 150        | 28,107                       | 1010,00        | 980,05       | 0,01987408                             |
| 160        | 27,900                       | 1199,40        | 1155,26      | 0,00308461                             |
| 170        | 27,700                       | 1228,71        | 1175,00      | 0,00308461                             |
| 180        | 27,476                       | 1257,93        | 1193,20      | 0,00308461                             |
| 190        | 27,245                       | 1287,06        | 1210,60      | 0,00308461                             |
| 200        | 27,000                       | 1316,10        | 1226,80      | 0,00308461                             |

### Радиационный баланс атмосферы (табл. 44.35, 44.36)

Солнечная постоянная равна полному количеству излучения, падающего на площадку  $1 \text{ см}^2$ , помещенную под прямым углом к солнечным лучам за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца до Земли [28]:

$$S_0 = 8,122 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин} = 1353 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Отражение солнечного излучения (табл. 44.37) [32].

Т а б л и ц а 44.34. Отношения  $P/P_c$ ,  $\rho/\rho_c$  и  $\sqrt{\rho/\rho_c}$ , скорость звука, вязкость и теплопроводность атмосферы в зависимости от геометрической высоты

| Геометрическая высота $h$ , м | $P/P_c$   | $\rho/\rho_c$ | $\sqrt{\rho/\rho_c}$ | Скорость звука $a$ , м/с | Вязкость                                                      |                                              | Теплопроводность $\lambda$ , $10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ |
|-------------------------------|-----------|---------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|                               |           |               |                      |                          | динамическая $\mu$ , $\text{Па} \cdot \text{с} \cdot 10^{-5}$ | кинематическая $\nu$ , $\text{м}^2/\text{с}$ |                                                                             |
| -2000                         | 1,26112   | 1,20666       | 1,09848              | 347,888                  | 1,8515                                                        | 1,2525—5                                     | 2,6359                                                                      |
| -1500                         | 1,19117   | 1,15218       | 1,07340              | 346,005                  | 1,8361                                                        | 1,3009—5                                     | 2,6106                                                                      |
| -1000                         | 1,12441   | 1,09966       | 1,04862              | 344,111                  | 1,8206                                                        | 1,3516—5                                     | 2,5853                                                                      |
| -500                          | 1,06073   | 1,04889       | 1,02416              | 342,208                  | 1,8050                                                        | 1,4048—5                                     | 2,5598                                                                      |
| 0                             | 1,00000   | 1,00000       | 1,00000              | 340,294                  | 1,7894                                                        | 1,4607—5                                     | 2,5343                                                                      |
| 500                           | 9,42130—1 | 9,52876—1     | 9,76154—1            | 338,370                  | 1,7737                                                        | 1,5195—5                                     | 2,5087                                                                      |
| 1000                          | 8,87010—1 | 9,07477—1     | 9,52616—1            | 336,435                  | 1,7579                                                        | 1,5813—5                                     | 2,4830                                                                      |
| 2000                          | 7,84618—1 | 8,21676—1     | 9,06464—1            | 332,532                  | 1,7260                                                        | 1,7147—5                                     | 2,4314                                                                      |
| 3000                          | 6,92042—1 | 7,42248—1     | 8,61538—1            | 328,584                  | 1,6938                                                        | 1,8628—5                                     | 2,3795                                                                      |
| 4000                          | 6,08541—1 | 6,68854—1     | 8,17835—1            | 324,589                  | 1,6612                                                        | 2,0275—5                                     | 2,3273                                                                      |
| 5000                          | 5,33415—1 | 6,01166—1     | 7,75349—1            | 320,545                  | 1,6282                                                        | 2,2110—5                                     | 2,2747                                                                      |
| 6000                          | 4,66002—1 | 5,38866—1     | 7,34075—1            | 316,452                  | 1,5949                                                        | 2,4162—5                                     | 2,2218                                                                      |
| 7000                          | 4,05677—1 | 4,81648—1     | 6,94008—1            | 312,306                  | 1,5612                                                        | 2,6461—5                                     | 2,1687                                                                      |
| 8000                          | 3,51854—1 | 4,29113—1     | 6,55144—1            | 308,105                  | 1,5271                                                        | 2,9044—5                                     | 2,1152                                                                      |
| 9000                          | 3,03979—1 | 3,81276—1     | 6,17475—1            | 303,848                  | 1,4926                                                        | 3,1957—5                                     | 2,0614                                                                      |
| 10000                         | 2,61533—1 | 3,37559—1     | 5,80999—1            | 299,532                  | 1,4577                                                        | 3,5251—5                                     | 2,0072                                                                      |
| 15000                         | 1,19534—1 | 1,58983—1     | 3,98727—1            | 295,069                  | 1,4216                                                        | 7,2995—5                                     | 1,9518                                                                      |
| 20000                         | 5,45699—2 | 7,25793—2     | 2,69405—1            | 295,069                  | 1,4216                                                        | 1,5989—4                                     | 1,9518                                                                      |
| 30000                         | 1,18137—2 | 1,50286—2     | 1,22591—1            | 301,709                  | 1,4753                                                        | 8,0134—4                                     | 2,0345                                                                      |
| 40000                         | 2,83388—3 | 3,26176—3     | 5,71119—2            | 317,189                  | 1,6009                                                        | 4,0067—3                                     | 2,2313                                                                      |
| 50000                         | 7,87354—4 | 8,38264—4     | 2,89528—2            | 329,799                  | 1,7037                                                        | 1,6591—2                                     | 2,3954                                                                      |
| 60000                         | 2,16714—4 | 2,52797—4     | 1,58996—2            | 315,073                  | 1,5837                                                        | 5,1141—2                                     | 2,2041                                                                      |
| 70000                         | 5,15261—5 | 6,76150—5     | 8,22283—3            | 297,061                  | 1,4377                                                        | 1,7358—1                                     | 1,9765                                                                      |
| 80000                         | 1,03871—5 | 1,50678—5     | 3,88172—3            | 282,538                  | 1,3208                                                        | 7,1558—1                                     | 1,7987                                                                      |

П р и м е ч а н и е. Запись вида 5,15261—5 означает:  $5,15261 \cdot 10^{-5}$ .

Альбедо — интегральное отношение отраженного по всем направлениям потока к потоку, упавшему на отражающую поверхность Земли, близко к 40%, причем основной вклад (75%) вносит альбедо облаков, а наименьшее значение (7%) имеет альбедо земной поверхности. Остальную часть составляет альбедо атмосферы.

Поглощение лучистой энергии в атмосфере (табл. 44.38) [32]. Основную роль в поглощении лучистой энергии в атмосфере играют кислород, озон, углекислый газ, водяной пар и пыль. В целом атмосферой поглощается 17—25% солнечного излучения. Кислород имеет полосы поглощения главным образом в ультрафиолетовой части спектра. В видимой части поглощение происходит в полосах  $A$  с центром около 0,76 мкм и  $B$  с центром около 0,69 мкм, однако поглощение в них мало и слабо влияет на ослабление излучения.

Озон образуется в результате поглощения солнечного излучения ( $\lambda < 242,0 \text{ нм}$ ) на высоте от 10 до 60 км с центром поглощения на высоте около 22 км. Основные полосы поглощения озона лежат также в ультрафиолетовой области. Наблюдаемый у земной поверхности спектр обрывается на длине волны  $\sim 300,0 \text{ нм}$ . В этой области спектра поглощение озоном солнечного излучения составляет около 2—3% всего интегрального потока.

Наиболее важной полосой поглощения углекислого газа является широкая полоса 12,9—17,1 мкм, расположенная в максимуме теплового излучения атмосферы.

Важнейшее значение в поглощении лучистой энергии в атмосфере имеет водяной пар. Это определяется не только большим его содержанием, но и очень большим числом линий и полос в его спектре. Наибольшее значение из них не имеют полосы, расположенные в инфракрасной области спектра.

В видимой области наиболее сильны две полосы:  $\lambda \sim 730 \div 685 \text{ нм}$  и «дождевая» полоса 606—585 нм.

Таблица 44.35. Спектральная интенсивность  
солнечного излучения на верхней границе атмосферы  
 $S_0$ , Вт·см<sup>-2</sup>·мкм, в зависимости от  $\lambda$ , нм [28]

| $\lambda$ | $S_0$  | $\lambda$ | $S_0$  | $\lambda$ | $S_0$  |
|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 0,22      | 0,0057 | 0,45      | 0,2006 | 0,80      | 0,1107 |
| 0,23      | 0,0067 | 0,46      | 0,2066 | 0,90      | 0,0889 |
| 0,24      | 0,0063 | 0,47      | 0,2033 | 1,00      | 0,0746 |
| 0,25      | 0,0070 | 0,48      | 0,2074 | 1,20      | 0,0484 |
| 0,26      | 0,0130 | 0,49      | 0,1950 | 1,40      | 0,0366 |
| 0,27      | 0,0232 | 0,50      | 0,1942 | 1,60      | 0,0244 |
| 0,28      | 0,0222 | 0,51      | 0,1882 | 1,80      | 0,0159 |
| 0,29      | 0,0482 | 0,52      | 0,1833 | 2,00      | 0,0103 |
| 0,30      | 0,0514 | 0,53      | 0,1842 | 2,20      | 0,0079 |
| 0,31      | 0,0689 | 0,54      | 0,1783 | 2,40      | 0,0064 |
| 0,32      | 0,0830 | 0,55      | 0,1725 | 2,60      | 0,0048 |
| 0,33      | 0,1059 | 0,56      | 0,1695 | 2,80      | 0,0039 |
| 0,34      | 0,1074 | 0,57      | 0,1712 | 3,00      | 0,0031 |
| 0,35      | 0,1093 | 0,58      | 0,1715 | 3,20      | 0,0023 |
| 0,36      | 0,1068 | 0,59      | 0,1700 | 3,40      | 0,0017 |
| 0,37      | 0,1181 | 0,60      | 0,1666 | 3,60      | 0,0013 |
| 0,38      | 0,1120 | 0,62      | 0,1602 | 3,80      | 0,0011 |
| 0,39      | 0,1098 | 0,64      | 0,1544 | 4,00      | 0,0009 |
| 0,40      | 0,1429 | 0,66      | 0,1486 | 4,50      | 0,0006 |
| 0,41      | 0,1751 | 0,68      | 0,1427 | 5,00      | 0,0004 |
| 0,42      | 0,1747 | 0,70      | 0,1369 | 6,00      | 0,0002 |
| 0,43      | 0,1639 | 0,72      | 0,1314 | 7,00      | 0,0001 |
| 0,44      | 0,1810 | 0,75      | 0,1235 |           |        |

Таблица 44.36. Средний радиационный баланс  
Северного полушария при средних условиях  
облачности [34]:

| Составляющие радиационного баланса                                          | Поток энергии, мВт/см <sup>2</sup> |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Инсоляция коротковолновым излучением на верхней границе атмосферы . . . . . | 35                                 |
| Поглощение излучения в атмосфере:                                           |                                    |
| общее . . . . .                                                             | 6                                  |
| озоном . . . . .                                                            | 0,9                                |
| водяным паром и пылью . . . . .                                             | 4,5                                |
| облаками . . . . .                                                          | 0,6                                |
| Отражение и рассеяние излучения в мировое пространство:                     |                                    |
| общее . . . . .                                                             | 123                                |
| атмосферой . . . . .                                                        | 2,4                                |
| облаками . . . . .                                                          | 8,4                                |
| земной поверхностью . . . . .                                               | 1,5                                |
| Поглощение излучения земной поверхностью:                                   |                                    |
| общее . . . . .                                                             | 16,5                               |
| прямое солнечное . . . . .                                                  | 7,8                                |
| пропущенное облаками . . . . .                                              | 5,0                                |
| рассеянное . . . . .                                                        | 3,7                                |
| Длинноволновое излучение (общее)                                            | 22,6                               |
| Эффективное излучение земной поверхности:                                   |                                    |
| тепловое . . . . .                                                          | 39,9                               |
| обратное излучение атмосферы . . . . .                                      | 33,6                               |
| эффективное . . . . .                                                       | 2,1                                |
| Тепловое излучение тропосферы:                                              |                                    |
| поглощенное тропосферой . . . . .                                           | 38                                 |
| собственное . . . . .                                                       | 53,4                               |
| Тепловое излучение в мировое пространство:                                  |                                    |
| земной поверхности . . . . .                                                | 1,9                                |
| тропосферы . . . . .                                                        | 19,7                               |
| стратосферы . . . . .                                                       | 0,98                               |

Таблица 44.37. Альbedo различных поверхностей

| Поверхность       | Альbedo, % | Поверхность                        | Альbedo, % |
|-------------------|------------|------------------------------------|------------|
| Чернозем:         |            | Вспаханное поле:                   |            |
| сухой . . . . .   | 14         | сухое . . . . .                    | 8—12       |
| влажный . . . . . | 8          | влажное . . . . .                  | 5—7        |
| Серозем:          |            | Рожь и пшеница . . . . .           | 10—25      |
| сухой . . . . .   | 25—30      | Трава:                             |            |
| влажный . . . . . | 10—12      | свежая . . . . .                   | 26         |
| Глина синяя:      |            | высохшая . . . . .                 | 19         |
| сухая . . . . .   | 23         | Древесная растительность . . . . . | 10—18      |
| влажная . . . . . | 16         |                                    |            |
| Песок желтый:     |            |                                    |            |
| сухой . . . . .   | 35         |                                    |            |
| серый . . . . .   | 18—23      |                                    |            |
| речной . . . . .  | 43         |                                    |            |

Таблица 44.38. Полосы поглощения водяного пара

| Полоса . . . . .                       | $\alpha$   | $\beta$    | $\rho$ | $\sigma$ | $\Psi$ | $\Omega$ |
|----------------------------------------|------------|------------|--------|----------|--------|----------|
| Центр полосы $\lambda$ , мкм . . . . . | 0,72       | 0,82       | 0,93   | 1,13     | 1,38   | 1,86     |
| Полоса . . . . .                       | $\omega_1$ | $\omega_2$ | $x$    | —        | $y$    |          |
| Центр полосы $\lambda$ , мкм . . . . . | 2,01       | 2,05       | 2,68   | 3,2—4,0  | 4,0    | —4,9     |

### Электрические явления в атмосфере [32]

**Ионы в атмосфере.** В результате ионизации газов, входящих в состав атмосферы, образуются первичные (молекулярные) ионы и устойчивые комплексы из 10—15 молекул (легкие ионы). Путем присоединения легких ионов к частицам аэрозоля образуются более крупные — ионы тяжелые и ультратяжелые. Обнаруживаются также средние или промежуточные ионы (табл. 44.39, 44.40), природа которых не вполне ясна.

Таблица 44.39. Основные группы атмосферных ионов [35]

| Группа ионов  | Подвижность, см <sup>2</sup> /(В·с)    | Радиус иона, нм |
|---------------|----------------------------------------|-----------------|
| Легкие        | 10 <sup>-2</sup> —1                    | 0,66—8          |
| Средние       | 10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-2</sup>     | 8—25            |
| Тяжелые       | 10 <sup>-3</sup> —2,5·10 <sup>-3</sup> | 25—55           |
| Ультратяжелые | ≤2,5·10 <sup>-3</sup>                  | >55             |

Капли тумана и облачных элементов имеют размеры 10<sup>-4</sup>—10<sup>-3</sup> см и могут иметь заряд, но к числу ионов обычно не относятся. Как правило, каждый ион несет один элементарный заряд, если его радиус меньше 10<sup>-6</sup> см.

Из многочисленных известных ионизаторов главнейшими для нижних слоев атмосферы являются излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере (табл. 44.41), а также космические лучи. Над океанами основным ионизатором является космическое излучение.

**Электрическое поле в атмосфере.** Почти всегда вертикальная составляющая электрического поля в ат-

Таблица 44.40. Среднее число ионов, возникающих за 1 с в 1 см<sup>3</sup> воздуха [35]

| Расположение<br>воздушной<br>массы | Ионизатор                                   |         |                               | Сумма     |
|------------------------------------|---------------------------------------------|---------|-------------------------------|-----------|
|                                    | Излучение радио-<br>активных элемен-<br>тов |         | Космиче-<br>ское<br>излучение |           |
|                                    | почвы                                       | воздуха |                               |           |
| Над сушей                          | 4,0                                         | 4,6     | 1,5—1,8                       | 10,1—10,4 |
| Над океаном                        | —                                           | —       | 1,5—1,8                       | 1,5—1,8   |

Таблица 44.41. Концентрация космогенных нуклидов в приземном слое воздуха [28]

| Нуклид          | Концентрация, $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк · м <sup>-3</sup> | Нуклид           | Концентрация, $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк · м <sup>-3</sup> |
|-----------------|--------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------|
| <sup>14</sup> C | $5 \cdot 10^{-13}$                                     | <sup>35</sup> S  | $10^{-15}$                                             |
| <sup>7</sup> Be | $(2-32) \cdot 10^{-14}$                                | <sup>32</sup> P  | $2 \cdot 10^{-16}$                                     |
| <sup>3</sup> H  | $10^{-13}-10^{-14}$                                    | <sup>22</sup> Na | $10^{-17}$                                             |

мосфере значительно превосходит его горизонтальные составляющие, что соответствует отрицательному заряду земной поверхности. Средняя поверхностная плотность электрического заряда Земли равна  $dQ/dS = -1,15 \cdot 10^{-13}$  Кл · см<sup>-2</sup>. Полный заряд Земли равен  $Q = -5,7 \cdot 10^5$  Кл. Приведенные значения получены в предположении, что средний вертикальный градиент электрического потенциала у земной поверхности равен 130 В/м.

**Электрические заряды осадков.** Частицы осадков всех видов несут на себе электрические заряды (табл. 44.42), которые возникают в результате нескольких групп процессов электризации, в числе которых соударение поляризованных частиц, захват частичками остатков воздушных ионов, разбрызгивание капель воды, электризация при изменении агрегатного состояния.

Таблица 44.42. Электрический заряд  $Q$  осадков различного происхождения и ток  $i$ , создаваемый ими

| Характер осадков | $Q_{ср}$ , Кл       | $Q_{max}$ , Кл     | $i_{ср}$ , А       | $i_{max}$ , А      |
|------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Обложной дождь   | $10^{-15}-10^{-14}$ | $5 \cdot 10^{-13}$ | $5 \cdot 10^{-15}$ | $5 \cdot 10^{-14}$ |
| Ливневый дождь   | $10^{-13}-10^{-12}$ | $5 \cdot 10^{-12}$ | $10^{-14}$         | $5 \cdot 10^{-13}$ |
| Град             | $10^{-11}$          | $10^{-10}$         | —                  | $10^{-11}$         |
| Снег             | $10^{-12}-10^{-11}$ | $5 \cdot 10^{-11}$ | $10^{-14}$         | $5 \cdot 10^{-13}$ |

Заряд отдельных капель меняется в очень широких пределах. Число положительно заряженных капель в среднем в 1,5 раза больше числа отрицательно заряженных. Это отношение меняется от 1:1 до 3:1. В то же время средний отрицательный заряд на одну каплю ( $1,3 \cdot 10^{-12}$  Кл) больше положительного ( $1,1 \cdot 10^{-12}$  Кл). Капли обложного дождя заряжены до 0,5—10 В, грозового ливня — до 300 В при среднем значении 40 В.

**Стратификация атмосферы в зависимости от степени ионизации [35].** Наблюдения за распространением радиоволн показали, что газы, образующие атмосферу, ионизированы. Известны четыре регулярно наблюдаемых более или менее ярко выраженных слоев:  $D$ ,  $E$ ,  $F_1$  и  $F_2$ .

Слой  $E$  и  $F_2$  непрерывны и простираются над всем земным шаром, а слой  $D$  и  $F_1$  появляются лишь в опре-

деленное время суток и года. Кроме того, в области непрерывных слоев  $E$  и  $F_2$  время от времени появляются спорадические слои, представляющие собой отдельные облака с большой концентрацией ионов и электронов. Нижняя граница ионосферы совпадает с началом слоя  $D$ . Число электронов в 1 см<sup>3</sup> составляет несколько тысяч. Слой  $D$  отражает длинные (в несколько километров) волны; при наклонном падении частично отражает и заметно поглощает короткие волны 30—100 м и сильно поглощает волны длиной 100—500 м. На высоте от 85—90 до 130—140 км располагается слой  $E$  — постоянно существующая область ионизации с максимумом концентраций электронов (до  $\sim 2 \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup>) на высоте 120—130 км. Ночью концентрация электронов уменьшается до  $5 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>. Слой  $E$  днем отражает и заметно поглощает волны длиннее 10 м, а при наклонном падении отражает более короткие волны (15—10 м). На уровне максимальной концентрации электронов слоя  $E$  находится нижняя граница полярных сияний.

На высоте 200—500 км в области слоев  $F_1$  и  $F_2$  наблюдается наибольшая концентрация электронов. Слой  $F_1$  образуется только летом в дневные часы в нормальных условиях на высоте 180—220 км. Максимальная концентрация электронов в слое  $F_1$  составляет  $(2-5) \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup>. Слой  $F_1$  существенно влияет на распространение коротких волн. Максимальная концентрация электронов в слое  $F_2$  составляет несколько миллионов в 1 см<sup>3</sup>. Высота зоны максимальной концентрации 200—400 км. Состояние слоя  $F_2$  оказывает большое влияние на распространение радиоволн в диапазоне 10—200 м. Выше максимума слоя  $F_2$  концентрация ионов и электронов очень медленно уменьшается с высотой, приближаясь на высоте 2000—3000 км к концентрации межпланетного газа ( $10^3-10^2$  см<sup>-3</sup>).

Ионизация верхней атмосферы в сильной степени определяется влиянием Солнца; степень ионизации изменяется со временем суток, с сезоном и фазой цикла солнечной активности. Сильное влияние на ионизацию оказывает также бомбардировка атмосферы частицами солнечного происхождения, вызывающими магнитные бури и полярные сияния. Область  $E$  предположительно соответствует области диссоциации  $O_2 \rightarrow O + O$ , а область  $D$  — ионизации  $O_2$ , соответствующей первому потенциалу ионизации. Максимумы ионизации областей  $F_1$  и  $F_2$  располагаются примерно на высоте 200 и 272 км соответственно. В течение ночи области  $F_1$  и  $F_2$  сливаются, образуя один слой ионизации. Слой  $D$  ночью исчезает, а слой  $E$  заметно рассасывается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geodetic Reference System 1967. Publication speciale du Bulletin geodesique. Paris: Bureau Central de l'AIG, 1970. P. 116.
2. Moritz H. Special Study Group 5.39. Fundamental geodetic constants. Trav. de l'AIG, t. 25, Rapports generaux et rapports techniques XVI Ass. Generale, Sept. 1975, Paris. 1976. P. 411—418.
3. Морозов В. П. Курс сферической гравиметрии: М.: Недра. 1979.
4. Гутенберг Б. Физика земных недр: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
5. Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и развитие: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
6. Космическая И. П. // Вестник АН СССР. 1965. Т. 2. С. 51.
7. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. С. 126—127.
8. Польдерварт А. // Земная кора: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. С. 130—135.
9. Берн Ф. Там же. С. 114—117.

10. Ферсман А. Е. Геохимия. М.: Объединенное науч.-техн. изд-во, 1933—1939. Т. 1—4.
11. Чердынцев В. В. Распространенность химических элементов. М.: Гостехиздат, 1956.
12. Веселов К. Е., Сагитова М. У. Гравиметрическая разведка. М.: Недра, 1968.
13. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985.
14. Саваренский Е. Ф., Лириос Д. П. Основы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гостехиздат, 1954.
15. Эйби Дж. А. Землетрясения: Пер. с англ. М.: Недра, 1982.
16. Проскурякова Т. А., Рыкунов Л. Н. Международный геофизический год. М.: Наука, 1963. Т. 5.
17. Helton B. S., Jonson D. P. // Proc. JBV. 1962. Vol. 50, N 11. P. 2328.
18. Яновский Б. М. Земной магнетизм. М.: Гостехиздат, 1953.
19. Почтарев В. И. Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1984.
20. Справочник по переменному магнитному полю Земли. Л.: Гидрометеониздат, 1954.
21. Краев А. П. Основы геоэлектрики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1950.
22. Виноградов П. А. // Геология и геофизика. 1963. № 12. С. 111—115.

23. Любимова Е. А. Тектоносфера Земли. М.: Наука, 1978.
24. Jacobs J. B. The Earth Interior. Encicl. of Physics. Ed. E. S. Flugge. Berlin: Springer Verlag, 1956. Vol. 47.
25. Будыко М. И., Кондратьев И. Я. // Космические исследования. 1964. Т. 2, вып. 1. С. 62—68.
26. Елизаров А. А. и др. Океанологические основы рыболовства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
27. Бруевич С. В. Элементарный состав воды Мирового океана // Тр. Ин-та Океанологии АН СССР. М.: Наука, 1948. Т. 2.
28. Физика океана. Гидрофизика океана / Под ред. А. С. Мониной. М.: Наука, 1978.
29. Дитрих Г., Колле К. Общее мореведение: Пер. с англ. Л.: Гидрометеониздат, 1961.
30. Гусев А. М. Основы океанологии. М.: Изд-во МГУ, 1983.
31. Баррс Л. С. Таблица скорости звука в морской воде. М.: Изд. ВЦ АН СССР, 1961.
32. Тверской П. Н. Курс метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1962.
33. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Изд-во стандартов, 1981.
34. Аверкиев М. С. Метеорология. М.: Изд-во МГУ, 1960. Т. 2.
35. Николс М. Аэрономия: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1964.

## ГЛАВА 45

### АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

Ю. Э. Любарский, Р. А. Сюняев

#### 45.1. НЕКОТОРЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И ПОСТОЯННЫЕ [1]

Наиболее часто используются следующие единицы: астрономическая единица,  $1 \text{ а.е.} = 1,495989(1) \times 10^{11} \text{ м}$ ; парсек,  $1 \text{ пк} = 3,085778 \cdot 10^{16} \text{ м}$ ; световой год,  $1 \text{ св. год} = 9,460530 \cdot 10^{15} \text{ м}$ ; тропический год (от равноденствия до равноденствия),  $\text{троп. год} = 31\,556\,926 \text{ с} = 365,24219 \text{ сут}$ ; Янский (единица спектральной плотности потока),  $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$ .

Звездные величины [1—3]. Отношение освещенностей  $E_1$  и  $E_2$ , создаваемых двумя звездами, связано с их звездными величинами  $m_1$  и  $m_2$  соотношением

$$E_2/E_1 = 10^{0,4(m_1 - m_2)}$$

Абсолютная звездная величина  $M$  равна видимой звездной величине  $m$ , которую имел бы объект, находясь на расстоянии 10 пк:

$$M = m + 5 - 5 \lg r,$$

где  $r$  — расстояние, пк.

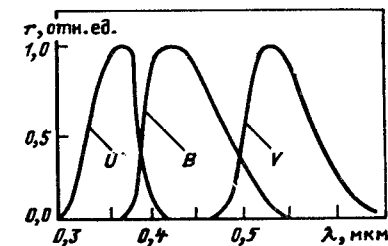


Рис. 45.1. Кривые пропускания фильтров  $U$ ,  $B$ ,  $V$  [3]

Поскольку получаемая от объекта энергия всегда измеряется в конечном интервале длин волн, обозначения видимых звездных величин снабжаются индексами, указывающими, в каком спектральном интервале проводилось измерение. Основой является трехцветная фотометрическая система  $UBV$ , в которой используются три стандартных спектральных интервала — ультрафиолетовый ( $U$ ), голубой ( $B$ ) и визуальный ( $V$ ) (рис. 45.1). Цвет звезды характеризуется разностью между звездными величинами, измеряемыми в различных диапазонах, например  $B-V$  или  $U-B$ . Звезда спектрального класса  $A_0$  имеет  $U-B=B-V=0$ . В настоящее время система  $UBV$  расширена в инфракрасный диапазон (табл. 45.1).

Звездная величина, соответствующая полному потоку энергии от объекта, называется болометрической

Таблица 45.1. Система стандартных фотометрических полос [3]

| Полоса | Эффективная длина волны, мкм | Эффективная ширина, мкм | Плотность потока, соответствующая $m = 0$ , Ян |
|--------|------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
| U      | 0,36                         | 0,04                    | 1880                                           |
| B      | 0,44                         | 0,10                    | 4440                                           |
| V      | 0,550                        | 0,08                    | 3810                                           |
| R      | 0,700                        | 0,21                    | 3010                                           |
| I      | 0,88                         | 0,22                    | 2430                                           |
| J      | 1,25                         | 0,3                     | 1770                                           |
| K      | 2,2                          | 0,6                     | 630                                            |
| L      | 3,5                          | 0,9                     | 310                                            |
| M      | 5,0                          | 1,1                     | 180                                            |
| N      | 10,4                         | 6,0                     | 43                                             |

$m_b$ . Светимость звезды с  $M_b=0$  равна  $2,97 \cdot 10^{28}$  Вт. Звезда с  $m_b=0$  создает на границе земной атмосферы поток энергии плотностью  $2,48 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>. Звезда с  $m_v=0$  создает на границе земной атмосферы освещенность  $2,54 \cdot 10^{-6}$  лк.

Приведены астрономические символы:

|                 |                  |                 |
|-----------------|------------------|-----------------|
| ☉ Солнце        | ♁ Земля          | ♅ Уран          |
| ☾ Луна          | ♂ Марс           | ♆ Нептун        |
| ☿ Меркурий      | ♄ Юпитер         | ♇ Плутон        |
| ♀ Венера        | ♄ Сатурн         | ☄ Комета        |
| ♈ Овен, 0°      | ♌ Лев, 120°      | ♏ Стрелец, 240° |
| ♉ Телец, 30°    | ♍ Дева, 150°     | ♐ Козерог, 270° |
| ♊ Близнецы, 60° | ♎ Весы, 180°     | ♑ Водолей, 300° |
| ♋ Рак, 90°      | ♏ Скорпион, 210° | ♒ Рыба, 330°    |

**Координаты на небесной сфере** [2]. Перечислим основные точки и системы координат на небесной сфере.

**Северный и южный полюсы мира** — точки пересечения небесной сферы с продолжением земной оси в северном и южном направлениях.

**Зенит и надир** — точки пересечения небесной сферы с продолжением линии отвеса в точке наблюдения вверх и вниз.

**Небесный экватор** — большой круг, образуемый пересечением небесной сферы с плоскостью земного экватора.

**Эклиптика** — видимый путь Солнца по небесной сфере. Наклонена под углом  $\epsilon=23^\circ 27'$  к плоскости небесного экватора.

**Точка весеннего равноденствия**  $\Upsilon$  — точка пересечения эклиптики с небесным экватором, которую Солнце проходит при движении из южного полушария в северное.

**Галактический экватор** — круг, образуемый пересечением небесной сферы с продолжением плоскости Галактики. Наклонен к плоскости небесного экватора под углом  $62^\circ 36'$ .

**Северный полюс Галактики**: точка пересечения небесной сферы с продолжением оси вращения Галактики в северном направлении. Экваториальные координаты  $\alpha=12^h 49^m$ ,  $\delta=27^\circ 24'$ .

**Галактический центр** имеет экваториальные координаты  $\alpha=17^h 42^m 24^s$ ,  $\delta=-28^\circ 55'$ .

**Экваториальная система координат** (рис. 45.2). Склонением  $\delta$  светила называется угол, выражаемый в градусах и отсчитываемый от небесного экватора до светила вдоль круга склонения (большого круга, проходящего через полюса мира и светило). Склонение считается положительным, если светило находится в северной полусфере. **Прямое восхождение**  $\alpha$  называется

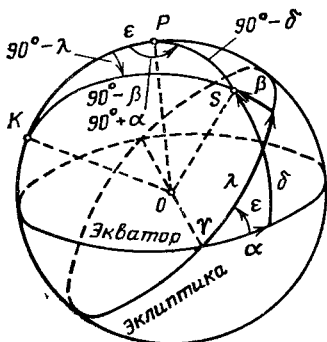


Рис. 45.2. Основные точки и координаты на небесной сфере: К, Р, S, О — полюс эклиптики, северный полюс мира, положение тела и положение наблюдателя [2]

угол, выражаемый в градусах (или часовой мере) и измеряемый от точки весеннего равноденствия вдоль небесного экватора в направлении от юга к востоку до точки пересечения небесного экватора с кругом склонения, проходящим через светило.

**Эклиптическая система координат** (рис. 45.2) **Астрономической широтой**  $\beta$  светила называется угол в градусах, измеряемый между эклиптикой и объектом вдоль круга астрономической широты (большого круга, проходящего через полюсы эклиптики и объект). Астрономическая широта считается положительной к северу от эклиптики. **Астрономической долготой**  $\lambda$  называется угол в градусах, измеряемый вдоль эклиптики через юг к востоку между точкой весеннего равноденствия и точкой пересечения эклиптики с кругом астрономической широты, проходящим через объект.

**Галактическая система координат**. **Галактической широтой**  $b$  светила называется угол, выражаемый в градусах и измеряемый вдоль круга галактической широты (большого круга, проходящего через галактические полюсы и светило) между галактическим экватором и светилом. Галактическая широта считается положительной к северу от галактического экватора. **Галактической долготой**  $l$  называется угол, выражаемый в градусах и измеряемый вдоль галактического экватора от галактического центра в направлении через юг к востоку до точки пересечения с кругом галактической широты, проходящим через светило.

## 45.2. СОЛНЦЕ

Приведем основные характеристики Солнца [1] (см. также рис. 45.3—45.5):

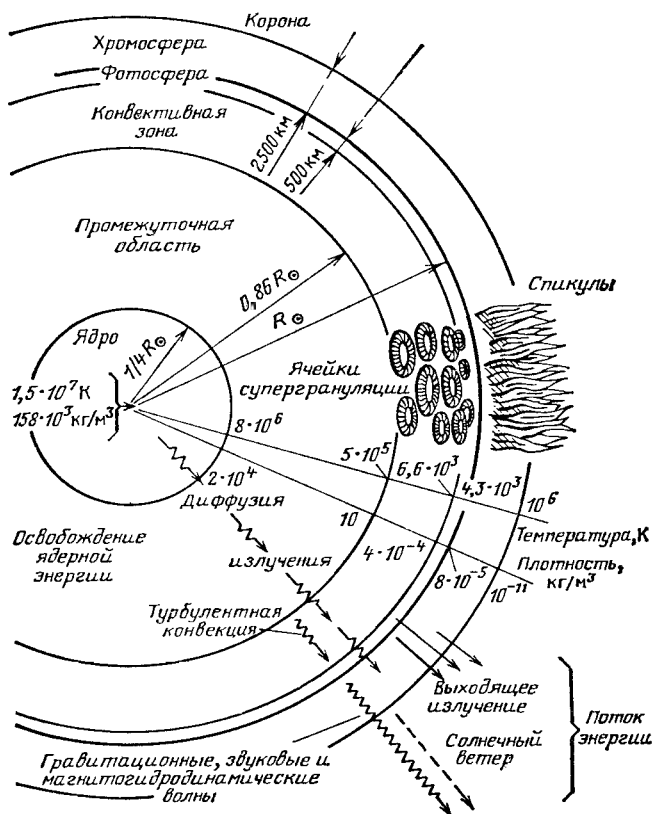


Рис. 45.3. Строение Солнца (масштаб не соблюден) [5]

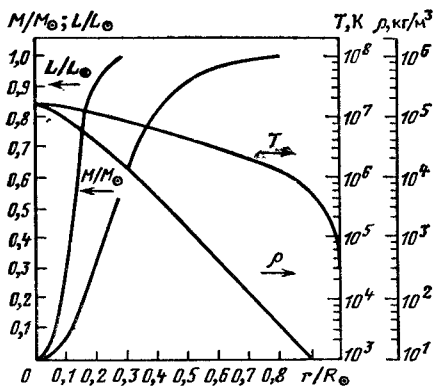


Рис. 45.4. Модель внутреннего строения Солнца [5]

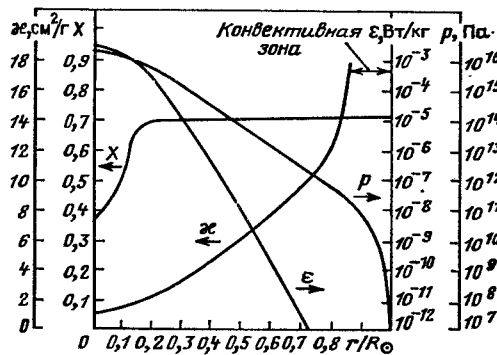


Рис. 45.5. Свойства солнечного вещества ( $X$  — доля водорода по массе,  $\chi$  — непрозрачность,  $\epsilon$  — скорость энерговыделения,  $p$  — давление) [5]

радиус  $R_{\odot} = 6,9599(7) \cdot 10^{10}$  см;  
 масса  $M_{\odot} = 1,989(1) \cdot 10^{33}$  г;  
 средняя плотность  $\rho = 1,409$  г/см<sup>3</sup>;  
 сидерический период (относительно неподвижных звезд) вращения (на широте  $\varphi = 17^\circ$ ) 25,38 сут;  
 синодический (относительно Земли) период 26,75 + 5,7 sin<sup>2</sup>  $\varphi$  сут;  
 наклон экватора к плоскости эклиптики  $7^\circ 15'$ ;  
 ускорение свободного падения на поверхности  $2,740 \cdot 10^4$  см/с<sup>2</sup>;  
 средняя магнитная индукция вблизи полюсов при минимуме пятен  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  Тл;  
 угловой диаметр на среднем расстоянии от Земли  $31' 59,26''$ .

Солнце имеет следующее положение в Галактике [1]:

расстояние от галактического центра  $(10 \pm 0,8)$  кпк;  
 расстояние от галактической плоскости к северу от нее  $(8 \pm 12)$  пк.

Солнце движется относительно ближайших звезд со скоростью 15,5 км/с в направлении  $\alpha = 17^h 40^m$ ,  $\delta = +21^\circ$  [4]; скорость вращения вокруг центра Галактики 250 км/с.

Солнце как звезда имеет следующие характеристики [1]:

$m_V = -26,74$ ;  $M_V = +4,83$ ;  
 $m_B = -26,09$ ;  $M_B = +5,48$ ;

$m_U = -25,96$ ;  $M_U = +5,61$ ;  
 $m_b = -26,82$ ;  $M_b = +4,75$ ;  
 спектральный класс G2V; эффективная температура 5770 К; возраст  $5 \cdot 10^9$  лет.

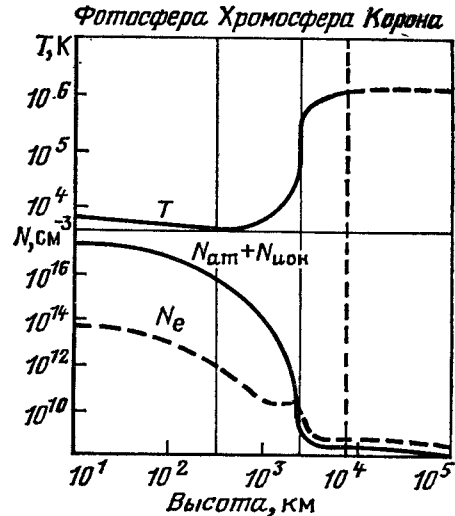


Рис. 45.6. Температура  $T$  и концентрация электронов  $N_e$ , ионов  $N_{\text{ион}}$  и нейтральных атомов  $N_{\text{ат}}$  в атмосфере Солнца. Высота отсчитывается от уровня единичной оптической толщины на длине волны 0,5 мкм [5]

Структура солнечной атмосферы (рис. 45.6) такова, Фотосфера — слой толщиной около 500 км, в котором формируется непрерывное излучение со спектром, близким к спектру излучения черного тела. На это излучение накладываются узкие линии поглощения — фраунгоферовы линии (табл. 45.2).

Хромосфера — переходная область между фотосферой и короной толщиной порядка  $10^4$  км. Излучает в линиях, которые наблюдаются во время затмения.

Корона — верхняя часть атмосферы Солнца, переходящая непосредственно в межпланетную среду. Высокая температура (порядка  $10^6$  К) короны поддерживается за счет энергии, выделяющейся при диссипации поднимающихся из фотосферы магнитных полей и диссипации звуковых и альфвеновских волн, возбуждаемых конвекцией в фотосфере. Электроны распределены в короне по закону [7]

$$N_e = 10^8 (0,036/r^{1,5} + 1,55/r^6 + 2,99/r^{16}).$$

Здесь  $N_e$  — плотность электронов, см<sup>-3</sup>;  $r$  — расстояние от центра солнца,  $R_{\odot}$ . Свечение короны в непрерывном спектре обусловлено рассеянием света Солнца на электронах. Наблюдаются сильные запрещенные линии высокоионизованных тяжелых элементов (табл. 45.3). Соответствующие переходы запрещены правилами отбора в дипольном приближении, поэтому их верхние состояния являются метастабильными. В обычных условиях они девозбуждаются столкновениями, но в среде малой плотности столкновения редки и девозбуждение происходит с излучением запрещенного кванта. Излучательная способность короны характеризуется ее мерой эмиссии  $ME = \int N_e^2 dV$ ; стандартное значение меры эмиссии короны равно  $4,4 \cdot 10^{49}$  см<sup>-3</sup>. Полный световой поток от короны за пределами  $1,3 R_{\odot}$  при максимуме пятен составляет  $1,3 \cdot 10^{-6}$  полного потока от Солнца, при минимуме пятен —  $0,8 \cdot 10^{-6}$  солнечного потока [1].

Наблюдаются вертикальные колебания атмосферы Солнца с периодом 5 мин. Их горизонтальный масштаб составляет 5000 км, амплитуда — около 0,4 км [5]. Некоторые данные указывают на колебания всей атмосферы Солнца или значительной ее части с периодом 160 мин [8]. Характеристики многочисленных нестационарных образований в атмосфере Солнца приведены в табл. 45.4.

Таблица 45.2. Самые сильные фраунгоферовы линии в спектре Солнца [5]

| Длина волны, нм | Эквивалентная ширина $W^*$ , нм | $W/\lambda$           | Поглощающий атом или ион |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 358,1209        | 0,2144                          | $5,99 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 371,9947        | 0,1664                          | $5,34 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 373,4874        | 0,3027                          | $9,45 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 373,7141        | 0,1071                          | $4,28 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 374,5574        | 0,1202                          | $4,59 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 374,9495        | 0,1907                          | $5,78 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 375,015         | 0,1388                          | $4,30 \cdot 10^{-4}$  | HI                       |
| 375,8245        | 0,1647                          | $4,97 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 377,063         | 0,1860                          | $6,21 \cdot 10^{-4}$  | HI                       |
| 379,790         | 0,3463                          | $10,85 \cdot 10^{-4}$ | HI                       |
| 382,0436        | 0,1712                          | $5,12 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 382,5891        | 0,1519                          | $4,21 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 383,2310        | 0,1685                          | $6,00 \cdot 10^{-4}$  | MgI                      |
| 383,539         | 0,2362                          | $7,19 \cdot 10^{-4}$  | HI                       |
| 383,8302        | 0,1920                          | $6,41 \cdot 10^{-4}$  | MgI                      |
| 385,9922        | 0,1554                          | $4,00 \cdot 10^{-4}$  | FeI                      |
| 388,905         | 0,2346                          | $7,22 \cdot 10^{-4}$  | HI                       |
| 393,3682        | 2,0253                          | $48,74 \cdot 10^{-4}$ | CaII                     |
| 396,8492        | 1,5467                          | $34,35 \cdot 10^{-4}$ | CaII                     |
| 397,0076        | 0,3076                          | $7,76 \cdot 10^{-4}$  | HI $\epsilon$            |
| 410,1748        | 0,3133                          | $7,46 \cdot 10^{-4}$  | HI $\delta$              |
| 434,0475        | 0,2855                          | $6,59 \cdot 10^{-4}$  | HI $\gamma$              |
| 486,1342        | 0,3680                          | $7,50 \cdot 10^{-4}$  | HI $\beta$               |
| 656,2808        | 0,4020                          | $6,49 \cdot 10^{-4}$  | HI $\alpha$              |

\* Эквивалентная ширина — ширина соседнего с линией участка непрерывного спектра, энергия которого равна энергии поглощенной в линии.

Таблица 45.3. Некоторые линии излучения короны в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [5]

| Переход                         | Ион     | Длина волны, нм | Эквивалентная ширина, нм |
|---------------------------------|---------|-----------------|--------------------------|
| $2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}$ | Ni XVI  | 360,1           | 0,13                     |
| $2P_{3/2} \rightarrow 2P_{1/2}$ | Fe XIV  | 530,3           | 2,00                     |
| $1D_2 \rightarrow 3P_2$         | Fe XIII | 338,8           | 1,00                     |
| $3P_2 \rightarrow 3P_1$         | Fe XIII | 107,98          | 3,00                     |
| $3P_1 \rightarrow 3P_0$         | Ni XV   | 670,2           | 0,12                     |
| $3P_1 \rightarrow 3P_0$         | Fe XIII | 1074,7          | 5,00                     |
| $3P_1 \rightarrow 3P_2$         | Fe XI   | 789,2           | 0,60                     |
| $2P_{1/2} \rightarrow 2P_{3/2}$ | Fe X    | 637,4           | 0,50                     |

Излучение Солнца характеризуют следующие величины [1]:

полная светимость  $L_{\odot} = 3,826(8) \cdot 10^{26}$  Вт;  
поток излучения с единицы поверхности  $6,284 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>;

Таблица 45.4. Характеристики образований в солнечной атмосфере [1, 3, 5]

| Образование            | Размеры, км                                        | Время жизни    | Температура, К                                              |
|------------------------|----------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| Солнечные пятна        | 2000—10 <sup>5</sup>                               | 1 сут — 10 мес | 4200 (тень)<br>5700 (полутень)                              |
| Гранулы                | 10 <sup>3</sup>                                    | 10 мин         | $T$ (гранулы) —<br>$T$ (промежуток между гранулами) = 300 К |
| Ячейки супергрануляции | $(2 \div 4) \cdot 10^4$                            | 20 ч           | —                                                           |
| Спикулы                | 1000 (горизонтальный);<br>7000 (вертикальный)      | 10 мин         | $(1 \div 4) \cdot 10^4$                                     |
| Факелы                 | $5 \cdot 10^3$ км                                  | 10 сут         | $T$ (факел) —<br>$T$ (фотосфера) = 1000 К                   |
| Протуберанцы           | 30 000 (высота)<br>20 000 (длина)<br>5000 (ширина) | 2 мес          | $(6 \div 8) \cdot 10^3$                                     |

сила света  $2,84 \cdot 10^{27}$  кд;  
освещенность, создаваемая Солнцем вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца, 127 000 лк;

солнечная постоянная (полная мощность излучения, которое падает на площадку единичной площади, помещенную вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца) 1373(20) Вт/м<sup>2</sup>.

Спектр Солнца показан на рис. 45.7—45.10. Большая часть излучения приходится от фотосферы. В коротковолновой области ( $\lambda \leq 100$  нм) спектр состоит из эмис-

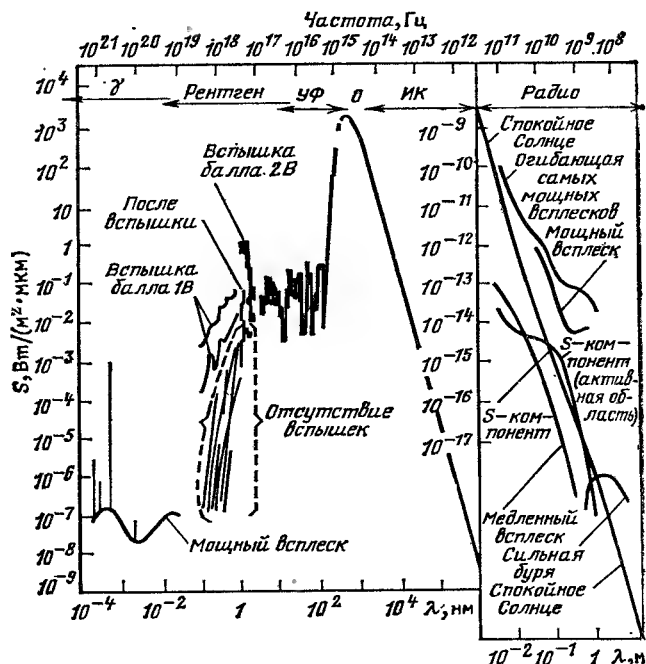


Рис. 45.7. Спектр Солнца [9]:

$\gamma$ , рентген УФ, О, ИК, радио —  $\gamma$ , рентгеновский, ультрафиолетовый, оптический, инфракрасный и радиодиапазоны;  $S$  — спектральная плотность потока

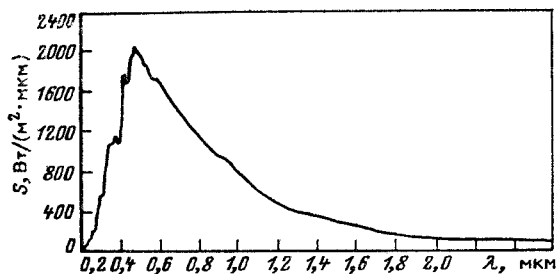


Рис. 45.8. Спектр Солнца ( $\lambda=0,2\div 2,6$  мкм) [5]

сионных линий многочисленных ионов, образующихся в хромосфере и короне.

Радиоизлучение Солнца в спокойном состоянии обусловлено тепловым излучением короны. На длинах волн  $\lambda > 1$  м яркостная температура излучения равна температуре электронов в короне (около  $10^6$  K). На меньших длинах волн корона становится прозрачной и ее яркостная температура убывает. При  $\lambda \leq 1$  см доминирует тепловое излучение хромосферы. Наблюдается также медленно меняющееся тепловое излучение (S-компонент), интенсивность которого хорошо коррелирует с площадью солнечных пятен. Характеристики различных типов сильно нестационарного излучения, обусловленного взрывным выделением энергии в активных областях солнечной атмосферы, приведены в 45.5, 45.6.

Поток нейтрино от Солнца равен  $2,1(3)$  солнечных нейтринных единиц [6] (1 солнечная нейтринная единица

соответствует  $10^{-36}$  поглощений за 1 с на 1 атом Cl в реакции  $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$ . Поскольку энергетический порог этой реакции составляет  $E_\nu = 0,814$  МэВ, регистрируются только самые энергичные нейтрино, возникающие на Солнце в реакции  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu$ . Основной поток солнечных нейтрино генерируется в реакции  $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$ , однако энергия этих нейтрино  $E_\nu < 0,420$  МэВ, и они не регистрируются).

**Солнечный цикл** [5]. Степень активности Солнца характеризуется числом Вольфа

$$W = 10g + f,$$

где  $g$  — число групп пятен;  $f$  — число солнечных пятен. Средняя продолжительность пятнообразовательного цикла (цикл активности Солнца) — 11,04 года (рис. 45.11). Наблюдались длительные периоды, когда пятнообразование прекращалось. Последний из них — маундеровский минимум — продолжался с 1645 по 1715 г.

### 45.3. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ, МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА [1]

**Основные сведения о планетах Солнечной системы** (см. также табл. 45.7—45.9, рис. 45.12, 45.13):

масса Земли  $M_\oplus = 5,976(4) \cdot 10^{27}$  г;

экваториальный радиус Земли  $R_\oplus = 6378$  км (о фигуре Земли см. гл. 44);

общая масса:

планет Солнечной системы  $447,8 M_\oplus$ ;

спутников планет  $0,12 M_\oplus$ ;

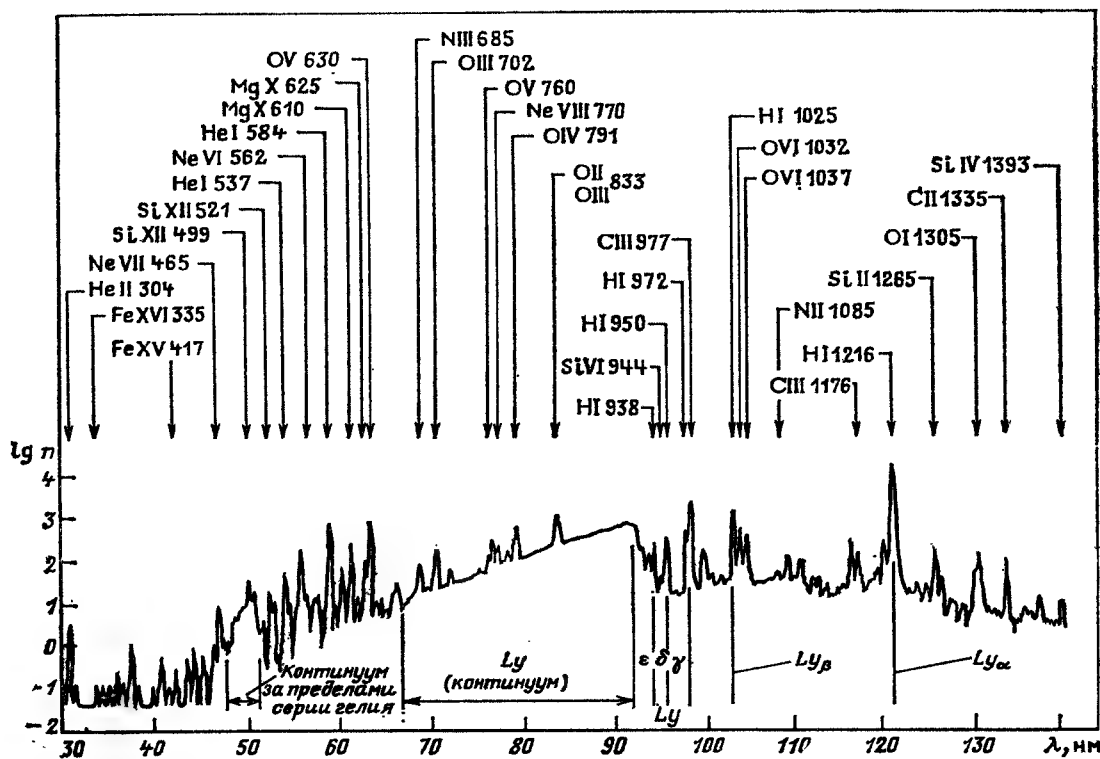


Рис. 45.9. Спектр Солнца в ультрафиолетовом диапазоне [5]:

$n$  — число импульсов за 0,08 с



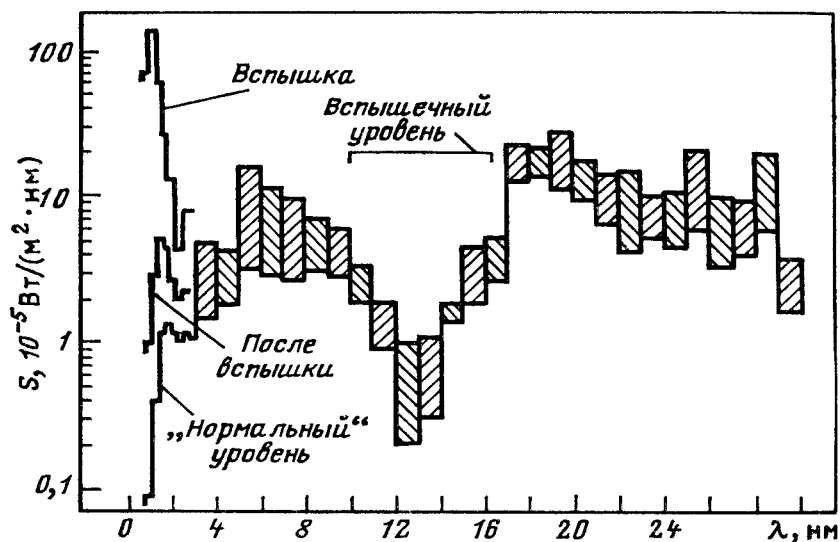


Рис. 45.10. Спектр Солнца в рентгеновском диапазоне [9]

Таблица 45.5. Средние характеристики радиовсплесков [10]

| Характеристика                                                  | Микроволновые всплески                 |                         |                                                                                                    | Всплески в метровом диапазоне    |                  |                                  |                       |                                  |                                    |                                      |                   |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
|                                                                 | импульс-<br>ные                        | посте-<br>пенные        | типа<br>IV p                                                                                       | типа<br>IV dm                    | типа<br>IV mF/mA | типа<br>IV mB                    | Шумовые бури          |                                  | типа II                            | типа III                             | типа V            |
|                                                                 |                                        |                         |                                                                                                    |                                  |                  |                                  | контину-<br>альные    | типа I                           |                                    |                                      |                   |
| Диапазон частот,<br>МГц                                         | ≥1000                                  |                         |                                                                                                    | ~150—<br>1500                    | ≤200             |                                  | ≤500                  |                                  | ≤200                               | ≤500                                 | ≤200              |
| Частота всплес-<br>ков в максимуме<br>солнечной актив-<br>ности | ≤1 ч <sup>-1</sup>                     | ≥1<br>сут <sup>-1</sup> | ~1—10 в месяц, очень интен-<br>сивные всплески происходят<br>в максимуме солнечной актив-<br>ности |                                  |                  |                                  | ~1—3<br>в неде-<br>лю | ≥10 <sup>3</sup> ч <sup>-1</sup> | 0,5 сут <sup>-1</sup>              | 3 ч <sup>-1</sup><br>(груп-<br>пами) | 1 ч <sup>-1</sup> |
| Ширина полосы,<br>МГц                                           | ~500—50 000                            |                         | ~5000—<br>50 000                                                                                   | 1000                             | >200             | ≤200                             | <500                  | ≥4                               | ~5                                 | 50—100                               |                   |
| Продолжитель-<br>ность                                          | ≤10 мин                                | ≥10<br>мин              | От 10 мин до несколь-<br>ких часов                                                                 |                                  |                  | До не-<br>сколь-<br>ких<br>часов | Часы<br>или<br>сутки  | <1 с<br>(группы<br>~0,5<br>мин)  | 5—30<br>мин                        | ≤10 с<br>(группы<br>1 мин)           | ≤1 мин            |
| Яркостная тем-<br>пература, К                                   | ~10 <sup>6</sup> —<br>10 <sup>10</sup> | ≤10 <sup>6</sup>        | ≤10 <sup>9</sup>                                                                                   | 10 <sup>7</sup> —10 <sup>8</sup> |                  | ≤10 <sup>10</sup>                |                       | ≥10 <sup>10</sup>                | ≤10 <sup>8</sup> —10 <sup>11</sup> |                                      |                   |
| Круговая поля-<br>ризация                                       | Отсутствует или<br>частичная           |                         | Частич-<br>ная                                                                                     | Частич-<br>ная,<br>сильная       | Слабая           | Очень сильная                    |                       |                                  | Очень<br>слабая                    | Частичная                            |                   |
| Линейная поля-<br>ризация                                       | Слабая                                 | —                       | Частич-<br>ная                                                                                     | 10%                              |                  |                                  | —                     | Очень слабая                     |                                    | Данные гена-<br>дежны                |                   |
| Угловой размер<br>источника, град                               | 1—4                                    | 1—2                     | 2—4                                                                                                | 3—5                              | 6—12             | 2—6                              | 2—10                  | 1—6                              | 6—≥30                              | 3—12                                 |                   |

Таблица 45.6. Характерные значения полной энергии,  $E$ , Дж, и мощности  $F$ , Вт, выделяемых в различных каналах для больших и малых солнечных вспышек [3]

| Канал                                                                                                                                                                                            | Самые большие вспышки                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                      | Субвспышка                                                                                     |                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                  | $E$                                                                                                                                                                  | $F$                                                                                                                                                                  | $E$                                                                                            | $F$                                                                                                  |
| Излучение:<br>длинноволновое рентгеновское и<br>ультрафиолетовое<br>оптическое непрерывное<br>в линии $H_{\alpha}$<br>коротковолновое рентгеновское<br>в $\gamma$ -диапазоне<br>в радиодиапазоне | $(3 \div 5) \cdot 10^{24}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{24}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{23}$<br>$(3 \div 5) \cdot 10^{19}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{18}$<br>$\sim 10^{17}$ | $(3 \div 5) \cdot 10^{21}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{21}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{20}$<br>$(3 \div 5) \cdot 10^{16}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{15}$<br>$\sim 10^{14}$ | $(1 \div 3) \cdot 10^{22}$<br>—<br>$10^{19}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{17} *$<br>—<br>$10^{15}$ | $(1 \div 3) \cdot 10^{20}$<br>—<br>$3 \cdot 10^{16}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{15}$<br>—<br>$10^{13}$ |
| Ускоренные частицы:<br>электроны ( $\geq 20$ кэВ)<br>протоны ( $\geq 20$ МэВ)                                                                                                                    | $(3 \div 5) \cdot 10^{24}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{24}$                                                                                                             | $(3 \div 5) \cdot 10^{21}$<br>$(1 \div 3) \cdot 10^{21}$                                                                                                             | $10^{20} *$<br>—                                                                               | $10^{18}$<br>—                                                                                       |
| Гидродинамические движения плазмы:<br>межпланетные выбросы и ударные<br>волны<br>движение над хромосферой                                                                                        | $(1 \div 3) \cdot 10^{25}$<br>$10^{25}$                                                                                                                              | —<br>$10^{22}$                                                                                                                                                       | —<br>$10^{22}$                                                                                 | —<br>$10^{19}$                                                                                       |

\* Для подавляющего большинства субвспышек отсутствует.

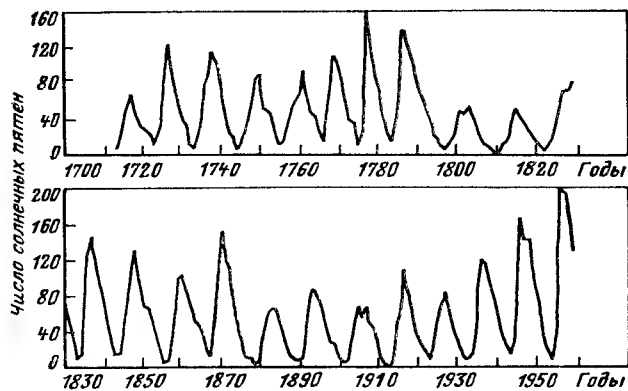


Рис. 45.11. Изменение числа Вольфа со временем [5]

астероидов  $3 \cdot 10^{-4} M_{\oplus}$ ;

метеоритного и кометного вещества  $10^{-9} M_{\oplus}$ ;

планетной системы  $448,0 M_{\oplus}$ .

Луна [1] имеет следующие характеристики:

среднее расстояние от Земли  $384\,401(1)$  км;

минимальное и максимальное удаление от Земли

$356\,400$ — $406\,700$  км;

сидерический период (относительно неподвижных

звезд)  $27,322$  сут;

синодический период (от новолуния до новолуния)

$29,531$  сут;

наклонение орбиты к эклиптике  $5^{\circ}8'43''$ , наблюда-

ются колебания  $\pm 9'$  с периодом  $173$  сут;

эксцентриситет орбиты  $0,0549$ ;

наклонение экватора к эклиптике  $1^{\circ}32,5'$ , к орбите

$6^{\circ}41'$ ;

средний радиус  $1738,2$  км;

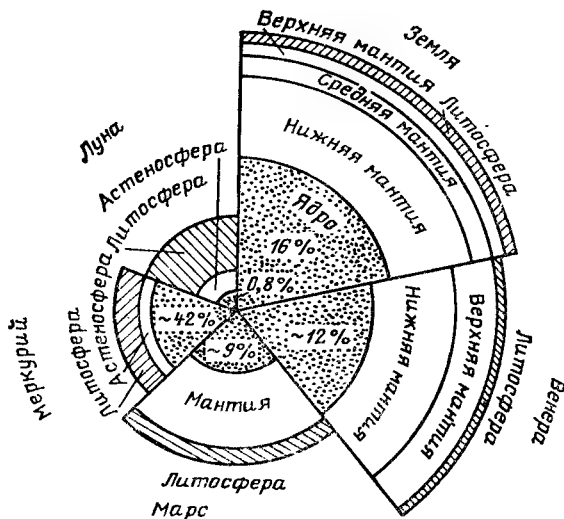
масса  $7,350 \cdot 10^{22}$  кг;

средняя плотность  $3,341 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

Таблица 45.7. Характеристики планет и их орбит [11]

| Планета  | Большая полуось<br>орбиты, а. е. | Орбитальный период | Наклонение орбиты<br>к эклиптике, град | Эксцентриситет<br>орбиты | Период вращения | Угол между осью<br>вращения и перпендикуляром к плоскости орбиты | Магнитный момент<br>[12], А·м <sup>2</sup> | Масса, $M_{\oplus}$ | Радиус, $R_{\oplus}$ | Средняя плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Ускорение свобод-<br>ного падения на по-<br>верхности, см/с <sup>2</sup> | Альбедо* |
|----------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------|
| Меркурий | 0,387                            | 87,969 сут         | 7,00                                   | 0,206                    | 58,7 сут        | $\sim 0$                                                         | $(2 \div 6) \cdot 10^{25}$                 | 0,055               | 0,382                | 5,4                                     | 370                                                                      | 0,06     |
| Венера   | 0,723                            | 224,701 сут        | 3,39                                   | 0,007                    | 243 сут         | —2                                                               | $< 3 \cdot 10^{24}$                        | 0,815               | 0,949                | 5,1                                     | 864                                                                      | 0,75     |
| Земля    | 1,00                             | 365,256 сут        | —                                      | 0,017                    | 23,9 ч          | 23,5                                                             | $8 \cdot 10^{28}$                          | 1,00                | 1,00                 | 5,5                                     | 980                                                                      | 0,6      |
| Марс     | 1,52                             | 1,88 года          | 1,85                                   | 0,093                    | 24,6 ч          | 24,0                                                             | —                                          | 0,107               | 0,533                | 3,9                                     | 370                                                                      | 0,24     |
| Юпитер   | 5,20                             | 11,9 года          | 1,30                                   | 0,049                    | 9,92 ч          | 3,1                                                              | $1,5 \cdot 10^{33}$                        | 318                 | 11,2                 | 1,3                                     | 2450                                                                     | 0,50     |
| Сатурн   | 9,54                             | 29,5 года          | 2,49                                   | 0,056                    | 10,7 ч          | 29                                                               | $4,7 \cdot 10^{31}$                        | 95,2                | 9,45                 | 0,7                                     | 1050                                                                     | 0,76     |
| Уран     | 19,2                             | 84,0 лет           | 0,77                                   | 0,047                    | 23,9 ч          | —82,1                                                            | —                                          | 14,6                | 4,10                 | 1,2                                     | 852                                                                      | 0,62     |
| Нептун   | 30,1                             | 165 лет            | 1,77                                   | 0,009                    | 17,8 ч          | 28,8                                                             | —                                          | 17,2                | 3,88                 | 1,6                                     | 1117                                                                     | 0,50     |
| Плутон   | 39,4                             | 248 лет            | 17,2                                   | 0,249                    | 6,39 сут        | $\geq 50$                                                        | —                                          | $\sim 0,002$        | $\sim 0,24$          | 0,8                                     | $\sim 300$                                                               | 0,09     |

\* Отношение количества света, отраженного всей поверхностью планеты, к количеству падающего на нее света.



ускорение свободного падения на поверхности 1,622 м/с<sup>2</sup>;

скорость освобождения на поверхности 2,38 км/с; видимая звездная величина в полнолунии —12,73, альbedo 0,067.

Характеристики спутников планет приведены в табл. 45.10.

Астероиды [3, 15]. Насчитывается около 3000 астероидов с определенными орбитами (табл. 45.11), причем 98% астероидов движутся между орбитами Марса и Юпитера, образуя пояс астероидов. Параметры их орбит:

большие полуоси 2,2—3,2 а.е.;

Рис. 45.12. Внутреннее строение планет земной группы. В процентах указаны относительные объемы ядер [13]

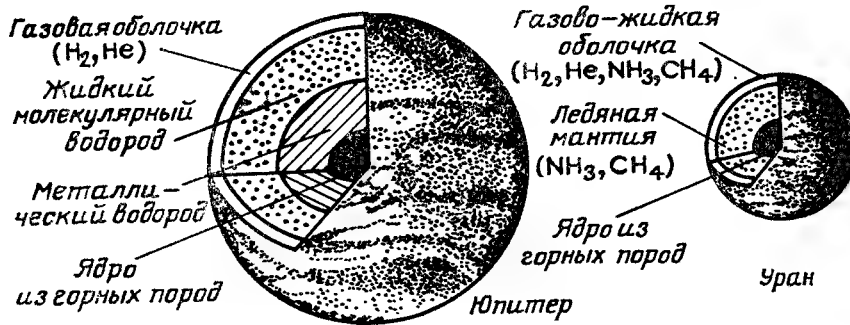


Рис. 45.13. Модель внутреннего строения Юпитера и Урана [13]

Таблица 45.8. Основные характеристики атмосфер планет [13] (см. также рис. 45.14)

| Характеристика                                     | Земля                                                                                                                                                                                                                                                                               | Меркурий            | Венера                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Марс                                                                                                                                               | Юпитер*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Химический состав (объемное содержание, %)         | N <sub>2</sub> (78);<br>CO (10 <sup>-5</sup> );<br>O <sub>2</sub> (21);<br>CH <sub>4</sub> (10 <sup>-4</sup> );<br>Ar (0,93);<br>H <sub>2</sub> (5·10 <sup>-5</sup> );<br>H <sub>2</sub> O (0,1—1);<br>Ne (10 <sup>-3</sup> );<br>CO <sub>2</sub> (0,03);<br>He (10 <sup>-4</sup> ) | —                   | CO <sub>2</sub> (95);<br>HCl (4·10 <sup>-5</sup> );<br>N <sub>2</sub> (3—5);<br>HF (10 <sup>-6</sup> );<br>Ar (0,01);<br>O <sub>2</sub> (<5·10 <sup>-4</sup> );<br>H <sub>2</sub> O (0,01—0,1);<br>SO <sub>2</sub> (10 <sup>-5</sup> );<br>CO (3·10 <sup>-3</sup> );<br>H <sub>2</sub> S (8·10 <sup>-3</sup> ) | CO <sub>2</sub> (95);<br>N <sub>2</sub> (2—3);<br>Ar (1—2);<br>H <sub>2</sub> O (10 <sup>-3</sup> —10 <sup>-1</sup> );<br>O <sub>2</sub> (0,1—0,4) | H <sub>2</sub> (87);<br>HCl (10 <sup>-5</sup> );<br>He (12,8);<br>C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (4·10 <sup>-2</sup> );<br>H <sub>2</sub> O (10 <sup>-4</sup> );<br>C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (8·10 <sup>-3</sup> );<br>CH <sub>4</sub> (7·10 <sup>-2</sup> );<br>PH <sub>4</sub> (4·10 <sup>-5</sup> );<br>NH <sub>3</sub> (2·10 <sup>-2</sup> );<br>CO (2·10 <sup>-7</sup> ) |
| Средняя молекулярная масса, а. е. м.               | 28,97                                                                                                                                                                                                                                                                               | —                   | 43,2                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 43,5                                                                                                                                               | 2,25                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Температура у поверхности (в средних широтах), К   | T <sub>max</sub> = 310<br>T <sub>min</sub> = 240                                                                                                                                                                                                                                    | —                   | 735<br>735                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 270<br>200                                                                                                                                         | 135<br>—                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Среднее давление у поверхности, Па                 | 10 <sup>5</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                     | <2·10 <sup>-9</sup> | 9·10 <sup>6</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 6·10 <sup>2</sup>                                                                                                                                  | 5·10 <sup>7</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Средняя плотность у поверхности, г/см <sup>3</sup> | 1,27·10 <sup>-3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                               | <10 <sup>-17</sup>  | 61·10 <sup>-3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1,2·10 <sup>-5</sup>                                                                                                                               | 10 <sup>-4</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

\* Юпитер не имеет твердой поверхности. Данные приведены для нижней границы стратосферы.

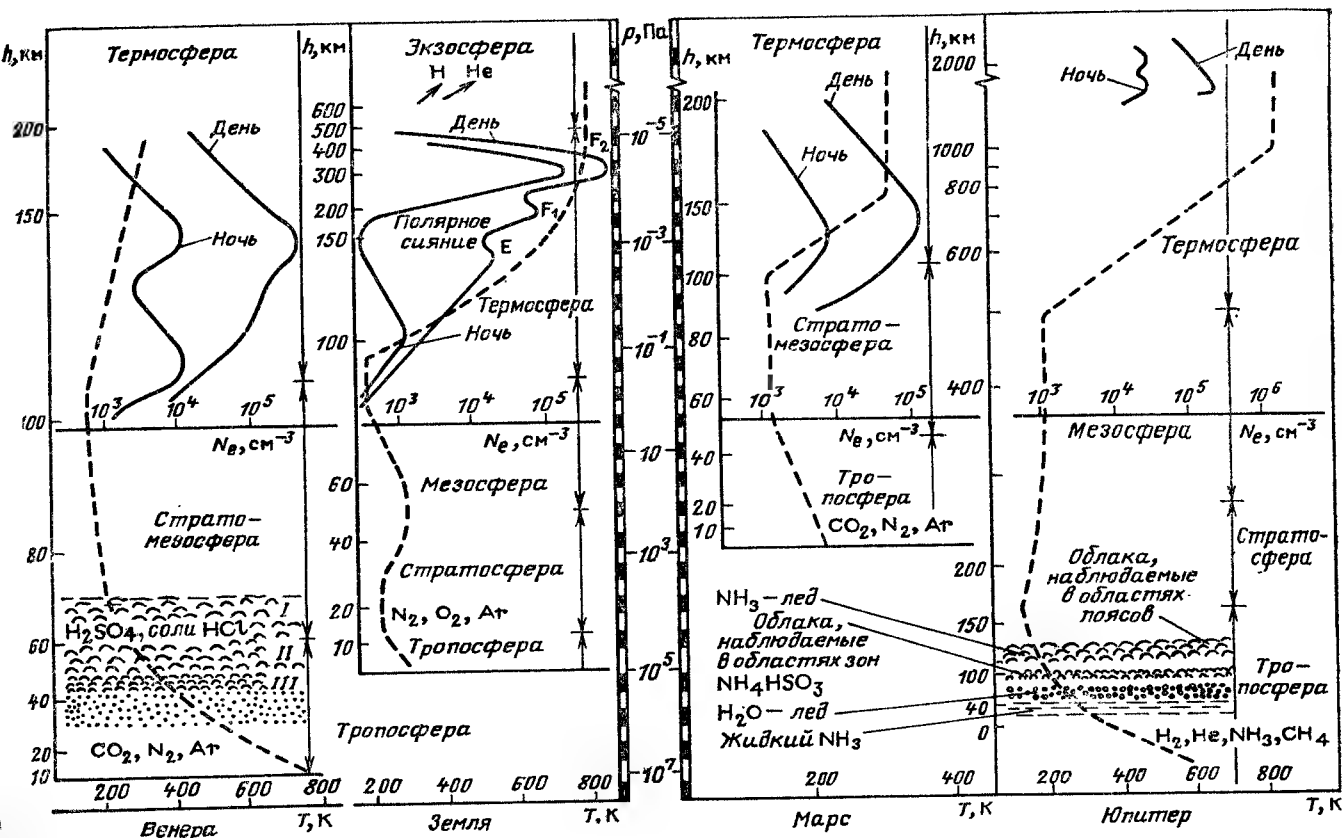


Рис. 45.14. Строение атмосфер Венеры, Земли, Марса, Юпитера. Показаны профили температуры  $T$  (пунктир) и электронной концентрации  $N_e$  (сплошные кривые). По вертикали отложены высота над поверхностью планеты  $h$  и давление  $p$  [13]

Таблица 45.9. Характеристики колец вокруг планет [13, 14]

| Планета | Внешний радиус, км | Ширина, км | Толщина, км | Число |
|---------|--------------------|------------|-------------|-------|
| Юпитер  | 126 000            | 600        | 1           | 1     |
| Сатурн  | 137 000            | 60 000     | 1—2         | 5     |
| Уран    | 53 000             | Гиреманная | —           | 9     |

периоды обращения 3—9 лет с пробелами около 4,0; 4,8 и 5,9 лет, т. е.  $1/3$ ,  $2/5$  и  $1/2$  периода Юпитера; эксцентриситеты 0—0,2; наклонение к эклиптике 5—15°.

Кометы [3, 16]. Источником комет в Солнечной системе служит облако Оорта, находящееся на расстоянии  $10^4$ — $10^5$  а.е. от Солнца. Облако содержит около  $10^{11}$  кометных ядер. Приведем характеристики комет (см. также табл. 45.12):

размеры ядра 0,5—20 км;

размеры головы на расстоянии около 1 а.е. от Солнца  $10^4$ — $10^6$  км;

длина хвоста на расстоянии около 1 а.е. от Солнца  $10^6$ — $10^7$  км;

расстояние от Солнца, на котором появляется хвост, 4—6 а.е.;

масса  $10^{11}$ — $10^{16}$  кг.

**Межпланетная среда.** Параметры солнечного ветра (рис. 45.15) вблизи орбиты Земли [3, 18]:

скорость 400—700 км/с;

температура  $5 \cdot 10^4$ — $5 \cdot 10^5$  К;

магнитная индукция  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  Тл (рис. 45.16);

плотность  $1$ — $10$  см $^{-3}$ ;

поток массы  $10^{11}$ — $10^{13}$  г/с;

поток кинетической энергии  $10^{19}$  Вт.

Гелиопауза (граница между солнечным ветром и межзвездной средой, рис. 45.17) находится на расстоянии от Солнца около 200 а.е. [19].

Размер зоны ионизованного водорода, окружающей Солнце, [20] в направлении движения Солнца составляет 5,5 а.е., в противоположном направлении — 20 а.е., под прямым углом к скорости движения — 10 а.е. Скорость движения Солнца относительно межзвездной среды 20 км/с в направлении  $\alpha = 252^\circ$ ,  $\delta = -15^\circ$ .

Межпланетная пыль [3] образует диск в плоскости эклиптики радиусом около 3 а.е., масса пылинок  $10^{-3}$ — $10^{-5}$  г. Полная масса пыли в Солнечной системе  $10^{19}$ — $10^{20}$  г. Наклонение орбит пылинок к эклиптике не превосходит 30—40°.

Т а б л и ц а 45.10. Характеристики спутников и их орбит [11] (в скобках указаны неустоявшиеся названия)

| Спутники                     |              | Большая полу-<br>ось, км | Орбитальный<br>период, сут | Эксцентриситет      | Наклонение<br>орбиты к<br>эклиптике,<br>град | Масса, $M_{\oplus}$ | Радиус, км |
|------------------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------------|------------|
| <i>Спутники Марса</i>        |              |                          |                            |                     |                                              |                     |            |
| Фобос                        |              | 9,380                    | 0,319                      | 0,018               | 1,0                                          | $1,3 \cdot 10^{-7}$ | 13 (1)     |
| Деймос                       |              | 23,500                   | 1,26                       | 0,002               | 2,0                                          | $2,7 \cdot 10^{-8}$ | 7,5 (1)    |
| <i>Спутники Юпитера</i>      |              |                          |                            |                     |                                              |                     |            |
| Галиле-<br>евы спут-<br>ники | (Адрастея)   | 128 000                  | 0,297                      | ~ 0                 | ~ 0                                          | —                   | ~ 20       |
|                              | (Метис)      | 127 000                  | 0,295                      | ~ 0                 | ~ 0                                          | —                   | ~ 20       |
|                              | Амальтея     | 181 000                  | 0,489                      | 0,003               | 0,4                                          | —                   | 135 (1)    |
|                              | Теба         | 221 000                  | 0,670                      | 0                   | 0                                            | —                   | 40         |
|                              | Ио           | 422 000                  | 1,77                       | Малый<br>переменный | 0,0                                          | 1,2                 | 1816       |
|                              | Европа       | 671 000                  | 3,55                       | То же               | 0,0                                          | 0,66                | 1563       |
|                              | Ганнмед      | 1 070 000                | 7,16                       | 0,001*1             | 0,2                                          | 2,0                 | 2638       |
|                              | Каллисто     | 1 880 000                | 16,7                       | 0,01                | 0,2                                          | 1,5                 | 2410       |
|                              | Леда         | 11 100 000               | 240                        | 0,146*1             | 26,7                                         | —                   | ~ 5        |
|                              | Гамалня      | 11 500 000               | 251                        | 0,158*1             | 27,6                                         | —                   | ~ 90       |
|                              | Лизифоя      | 11 700 000               | 260                        | 0,130*1             | 29,0                                         | —                   | ~ 10       |
|                              | Элара        | 11 700 000               | 260                        | 0,207*1             | 24,8                                         | —                   | ~ 40       |
|                              | Ананке       | 20 700 000               | 617*2                      | 0,17*1              | 33                                           | —                   | ~ 10       |
|                              | Карма        | 22 400 000               | 692*2                      | 0,21*1              | 16                                           | —                   | ~ 15       |
|                              | Пасифея      | 23 300 000               | 735*2                      | 0,38*1              | 35                                           | —                   | ~ 20       |
|                              | Синопа       | 23 700 000               | 758*2                      | 0,28*1              | 27                                           | —                   | ~ 15       |
| <i>Спутники Сатурна</i>      |              |                          |                            |                     |                                              |                     |            |
|                              | (Атлас)      | 138 000                  | 0,602                      | 0,002               | 0,3                                          | —                   | 20 (1)     |
|                              | S27          | 139 000                  | 0,613                      | 0,004               | 0,0                                          | —                   | 70 (1)     |
|                              | S26          | 142 000                  | 0,629                      | 0,004               | 0,1                                          | —                   | 55 (1)     |
|                              | Эпиметеус    | 151 000                  | 0,694                      | 0,009               | 0,3                                          | —                   | 70 (1)     |
|                              | Янус         | 152 000                  | 0,695                      | 0,007               | 0,1                                          | —                   | 110 (1)    |
|                              | Мимас        | 186 000                  | 0,942                      | 0,020               | 1,5                                          | ~ 0,0005            | 196        |
|                              | Энцелад      | 238 000                  | 1,37                       | 0,004               | 0,0                                          | ~ 0,001             | 255        |
|                              | Тефия        | 295 000                  | 1,89                       | 0,000               | 1,1                                          | ~ 0,01              | 530        |
|                              | Телеста      | 295 000                  | 1,89                       | —                   | —                                            | —                   | 17 (1)     |
|                              | Каллипсо     | 295 000                  | 1,89                       | —                   | —                                            | —                   | 17 (1)     |
|                              | Диона        | 377 000                  | 2,74                       | 0,0022              | 0,0                                          | 0,014               | 560        |
|                              | S6 (Диона В) | 377 000                  | 2,74                       | 0,005               | 0,2                                          | —                   | 18 (1)     |
|                              | Рей          | 527 000                  | 4,52                       | 0,001               | 0,4                                          | 0,034               | 765        |
|                              | Титан        | 1 220 000                | 16,0                       | 0,029               | 0,3                                          | 1,8                 | 2575       |
|                              | Гиперион     | 1 480 000                | 21,3                       | 0,104               | 0,4                                          | —                   | 205 (1)    |
|                              | Япет         | 3 560 000                | 79,3                       | 0,028               | 14,7*1                                       | 0,026               | 730        |
|                              | Феба         | 13 000 000               | 550*2                      | 0,163               | 30                                           | —                   | 110        |
| <i>Спутники Урана</i>        |              |                          |                            |                     |                                              |                     |            |
|                              | Миранда      | 130 000                  | 1,41                       | 0,000               | ~ 0                                          | 0,0005              | ~ 160      |
|                              | Ариель       | 192 000                  | 2,52                       | 0,003               | ~ 0                                          | 0,03                | ~ 705      |
|                              | Умбриэль     | 267 000                  | 4,14                       | 0,004               | ~ 0                                          | 0,01                | ~ 580      |
|                              | Титанья      | 438 000                  | 8,71                       | 0,002               | ~ 0                                          | 0,04                | ~ 845      |
|                              | Оберон       | 586 000                  | 13,5                       | 0,001               | ~ 0                                          | 0,04                | ~ 760      |
| <i>Спутники Нептуна</i>      |              |                          |                            |                     |                                              |                     |            |
|                              | Тритон       | 355 000                  | 5,88*2                     | 0,000               | 20                                           | 0,8                 | 1600       |
|                              | Неранда      | 5 560 000                | 360                        | 0,75                | 28                                           | $2 \cdot 10^{-8}$   | 470        |
| <i>Спутник Плутона</i>       |              |                          |                            |                     |                                              |                     |            |
| (Харон)                      |              | ~ 17 000                 | 6,39                       | ~ 0                 | —                                            | ~ 0,02              | ~ 400      |

\*1 Эксцентриситет орбиты переменный.

\*2 Вращение обратное.

Таблица 45.11. Параметры некоторых астероидов и их орбиты [1, 15]

| Название | Радиус, км | Масса, кг           | Период вращения | Орбитальный период, сут | Большая полуось орбиты, а. е. | Эксцентриситет | Наклонение орбиты к эклиптике, град |
|----------|------------|---------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Церера   | 500        | $1,2 \cdot 10^{21}$ | 9 ч 05 мин      | 1681                    | 2,766                         | 0,079          | 10,6                                |
| Паллада  | 304        | $2,3 \cdot 10^{19}$ | 10 ч            | 1684                    | 2,768                         | 0,235          | 34,8                                |
| Юнона    | 123        | —                   | 7 ч 13 мин      | 1594                    | 2,668                         | 0,256          | 13,0                                |
| Веста    | 269        | $2,4 \cdot 10^{19}$ | 5 ч 20 мин      | 1325                    | 2,362                         | 0,088          | 7,1                                 |
| Геба     | 100        | —                   | 7 ч 17 мин      | 1380                    | 2,426                         | 0,203          | 14,8                                |
| Ирис     | 104        | —                   | 7 ч 07 мин      | 1344                    | 2,386                         | 0,230          | 5,5                                 |
| Гигия    | 225        | —                   | 18 ч            | 2042                    | 3,151                         | 0,099          | 3,8                                 |
| Евномия  | 136        | —                   | 6 ч 05 мин      | 1569                    | 2,643                         | 0,185          | 11,7                                |
| Психея   | 125        | —                   | 4 ч 18 мин      | 1826                    | 2,923                         | 0,135          | 3,1                                 |
| Икар     | 0,7        | —                   | 2 ч 16 мин      | 408                     | 1,078                         | 0,827          | 23,0                                |

Таблица 45.12. Характеристики некоторых короткопериодических комет [1, 16]

| Комета         | Прохождение перигелия |                   | Период, лет | Наклонение орбиты к эклиптике, град | Эксцентриситет | Перигелийное расстояние, а. е. | Большая полуось, а. е. |
|----------------|-----------------------|-------------------|-------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|
|                | последнее, год        | число возвращений |             |                                     |                |                                |                        |
| Галлея         | 1986                  | 30                | 76,1        | 162                                 | 0,97           | 0,59                           | 17,8                   |
| Энке           | 1977                  | 51                | 3,31        | 12                                  | 0,85           | 0,34                           | 2,21                   |
| Темпеля-2      | 1978                  | 16                | 5,26        | 12                                  | 0,55           | 1,37                           | 3,0                    |
| Ольберса       | 1956                  | 3                 | 69          | 45                                  | 0,93           | 1,20                           | 16,8                   |
| Кроммелина     | 1956                  | 6                 | 27,9        | 29                                  | 0,92           | 0,74                           | 9,2                    |
| Понса — Брукса | 1954                  | 3                 | 71          | 74                                  | 0,96           | 0,78                           | 17,2                   |

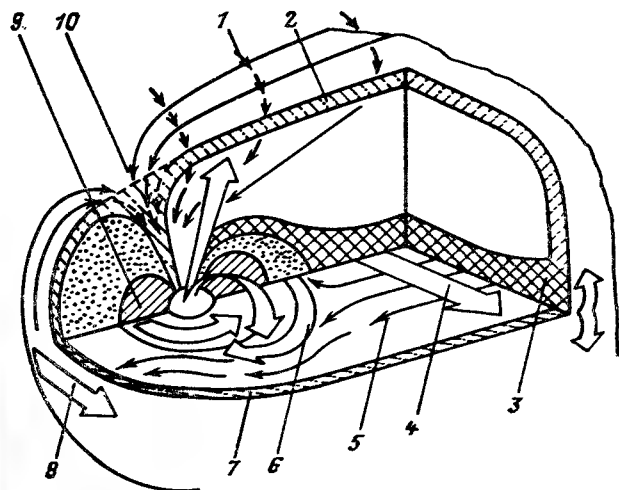


Рис. 45.15. Обтекание магнитосферы Земли солнечным ветром [17]:

1 — межпланетное магнитное поле; 2 — плазменная мантия; 3 — плазменный слой; 4 — ток поперек хвоста; 5 — конвекция плазмы; 6 — кольцевой ток; 7 — магнитопауза; 8 — ток на магнитопаузе; 9 — плазмосфера (вращается вместе с Землей); 10 — касп

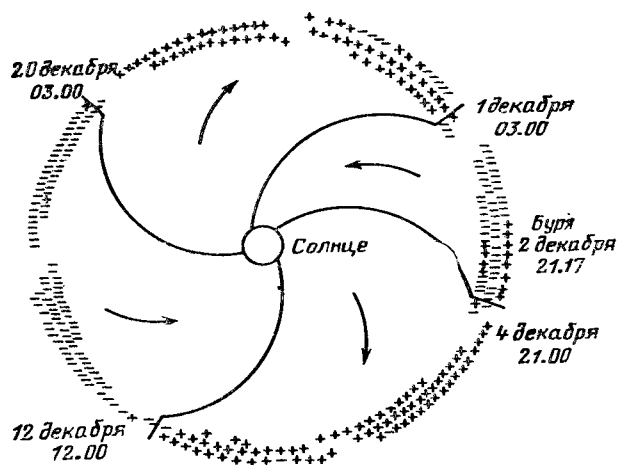


Рис. 45.16. Секторная структура межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики:

знак плюс показывает поле, направленное от Солнца, знак минус — поле, направленное к Солнцу [18]

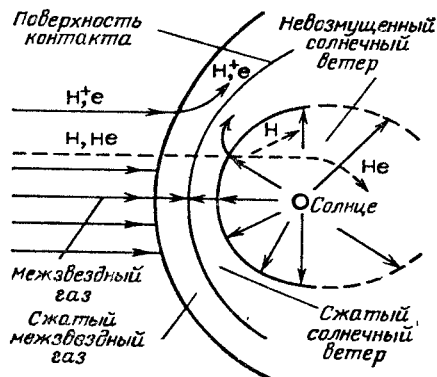


Рис. 45.17. Взаимодействие между солнечным ветром и межзвездной средой:

сплошные линии — траектории протонов и электронов межзвездного газа, пунктир — траектории нейтральных атомов, жирные линии — внешняя и внутренняя ударные волны [19]

#### 45.4. ЗВЕЗДЫ

Основные типы спектральных классов приведены в табл. 45.13

Т а б л и ц а 45.13. Спектральная классификация звезд [1—3]

| Спектральный класс | Характеристики класса                                                                  | Поверхностная температура, К | Цвет звезды (B—V)                        |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| O                  | Горячие звезды с линиями поглощения He II                                              | 30 000—50 000                | Голубой (—0,3 <sup>m</sup> )             |
| B                  | Линии поглощения He I (линии H усиливаются к классу A)                                 | 12 000—30 000                | Голубовато-белый (0,0—0,3 <sup>m</sup> ) |
| A                  | Линии H достигают наибольшей интенсивности и затем ослабевают; усиливаются линии Ca II | 7600—11 000                  | Белый (0,2—0,0 <sup>m</sup> )            |
| F                  | Линии Ca II усиливаются, линии H ослабевают; развиваются линии металлов                | 7600—6000                    | Желто-белый (0,6—0,3 <sup>m</sup> )      |
| G                  | Сильные линии Ca II и других металлов; линии H ослабевают                              | 5000—6000                    | Желтый (0,8—0,6 <sup>m</sup> )           |
| K                  | Сильные линии металлов; появляются полосы поглощения CN и CN                           | 4000—5000                    | Оранжевый (1,4—0,8 <sup>m</sup> )        |
| M                  | Сильные полосы TiO                                                                     | 2500—4000                    | Красный (2,0—1,4 <sup>m</sup> )          |

Каждый спектральный класс делится на 10 подклассов, обозначаемых цифрами от 0 до 9 (в сторону уменьшения температуры), которые ставятся после буквы. После обозначения спектрального класса римской цифрой указывается класс светимости звезды: I — сверхгиганты, II — яркие гиганты, III — гиганты, IV —

субгиганты, V — главная последовательность, VI — субкарлики, VII — белые карлики (табл. 45.14, 45.15).

Кроме перечисленных выделяют дополнительные спектральные классы:

S — звезды, отличающиеся наличием в спектре полос поглощения ZrO, по физическим характеристикам соответствуют классу K;

N и R — звезды, отличающиеся наличием в спектре полос поглощения молекулярных соединений углерода, окиси углерода и циана; соответствуют соответственно основным спектральным классам K и G;

Т а б л и ц а 45.14. Характеристики звезд различных спектральных классов [2]

| Звезда                             | Спектральный класс и класс светимости | Эффективная температура, К | Светимость, $L_{\odot}$ | Радиус, $R_{\odot}$ | Масса, $M_{\odot}$ |
|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| $\alpha$ Скорпиона А (Антарес)     | M0I                                   | 3300                       | 34 000                  | 530                 | 19                 |
| $\alpha$ Волопаса (Арктур)         | K2III                                 | 4000                       | 130                     | 26                  | 4,2                |
| $\eta$ Орiona                      | B1V                                   | 23 000                     | 13 000                  | 7,2                 | 13,7               |
| $\alpha$ Большого Пса А (Сириус А) | A1V                                   | 9700                       | 61                      | 2,4                 | 3,3                |
| Звезда Барнарда                    | M5V                                   | 3000                       | 0,015                   | 0,50                | 0,38               |
| $\alpha$ Большого Пса В (Сириус В) | A5VII                                 | 8200                       | $2,6 \cdot 10^{-3}$     | $2,6 \cdot 10^{-2}$ | 0,96               |

Т а б л и ц а 45.15. Характеристики некоторых ярких звезд [1]

| Звезда                               | Видимая визуальная величина | Абсолютная визуальная звездная величина | Спектральный класс и класс светимости | Расстояние, пк |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Полярная ( $\alpha$ Малой Медведицы) | 2,3*                        | —4,6                                    | F8I                                   | 240            |
| Ахернар ( $\alpha$ Эридана)          | 0,48                        | —2,2                                    | B5IV—V                                | 39             |
| Алголь ( $\beta$ Персея)             | 2,2*                        | —0,3                                    | B8V                                   | 32             |
| Альдебаран ( $\alpha$ Тельца)        | 0,85                        | —0,7                                    | K5III                                 | 21             |
| Капелла ( $\alpha$ Возничего)        | 0,08                        | —0,6                                    | G8+F                                  | 14             |
| Ригель ( $\beta$ Орiona)             | 0,11                        | —7,0                                    | B8I                                   | 250            |
| Бетельгейзе ( $\alpha$ Орiona)       | 0,8*                        | —6                                      | M2I                                   | 200            |
| Канопус ( $\alpha$ Киля)             | —0,73                       | —4,7                                    | F0I                                   | 60             |
| Сириус ( $\alpha$ Большого Пса)      | —1,45                       | 1,41                                    | A1V                                   | 2,7            |
| Процион ( $\alpha$ Малого Пса)       | 0,35                        | 2,65                                    | F5IV                                  | 3,5            |
| Спика ( $\alpha$ Девы)               | 0,96                        | —3,4                                    | B1V                                   | 80             |
| $\alpha$ Центавра                    | —0,1                        | 4,3                                     | G2V                                   | 1,33           |
| Арктур ( $\alpha$ Волопаса)          | —0,06*                      | —0,2                                    | K2pIII                                | 11             |
| Антарес ( $\alpha$ Скорпиона)        | 1,0                         | —4,7                                    | M1I                                   | 130            |
| Вега ( $\alpha$ Лиры)                | 0,04                        | 0,5                                     | A0V                                   | 8,1            |
| Альтаир ( $\alpha$ Орла)             | 0,77                        | 2,3                                     | A7V                                   | 5,0            |

\* Переменная звезда.

Q — новые звезды;  
W — звезды Вольфа — Райе — горячие звезды с широкими эмиссионными линиями.

**Диаграмма Герцшпрунга — Рассела [21]** (рис. 45.18) связывает светимости и спектральные классы звезд. Каждому типу звезд на диаграмме соответствует своя зона. Наиболее многочисленный тип звезд принадлежит *главной последовательности*. Это звезды, источник энергии которых служат термоядерные реакции  $H \rightarrow He$ . Минимальная масса, необходимая для того, чтобы в недрах звезды начались термоядерные реакции, равна  $0,085 M_{\odot}$  [22]. В звездах массой  $M \leq M_{\odot}$  основной реакцией является  $pp$ -цикл (см. гл. 39). В условиях звездных недр скорость энерговыделения, Вт/кг, при  $pp$ -реакции равна

$$\epsilon_{pp} = 2,50 \rho X^2 T_6^{-2/3} \exp(-33,8 T_6^{-1/3}),$$

где  $\rho$  — плотность, г/см<sup>3</sup>;  $X$  — массовая доля водорода;  $T_6$  — температура вещества,  $10^6$  К. В звездах массой  $M > M_{\odot}$  основным источником энергии служит двойной CNO-цикл (см. гл. 39), для которого скорость энерговыделения

$$\epsilon_{CNO} = 9,5 \cdot 10^{24} \rho X X_{CN} T_6^{-2/3} \exp(-152,3 T_6^{-1/3}),$$

где  $X_{CN}$  — массовая доля углерода и азота.

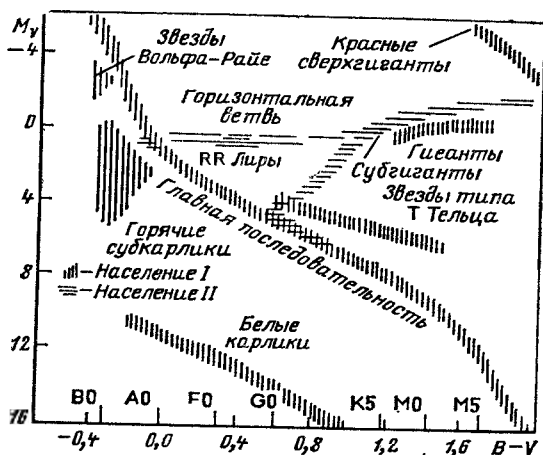


Рис. 45.18. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела [2]

(94 компонента) и 23 кратные системы (81 компонент) [1].

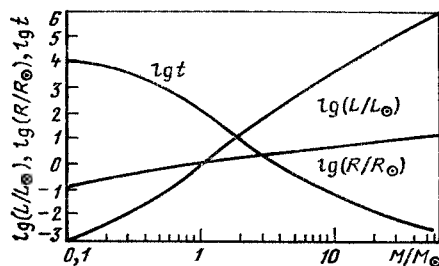


Рис. 45.19. Зависимость светимости  $L$  и радиуса  $R$  звезды главной последовательности от ее массы. Здесь же приведено время  $t$ ,  $10^9$  лет, пребывания звезды на главной последовательности [1]

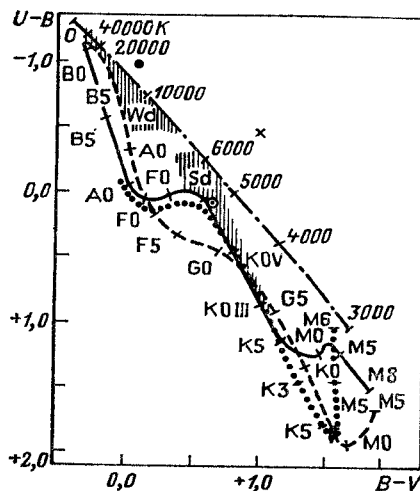


Рис. 45.20. Связь между показателями цвета  $U-B$  и  $B-V$  для звезд главной последовательности (сплошная линия), сверхгигантов (пунктир), гигантов (точки). Заштрихованы области, занимаемые белыми карликами (Wd) и субкарликами (Sd). Штрихпунктирная линия соответствует излучению черного тела. Показано положение Солнца ( $\odot$ ), квазара 3C273 ( $\bullet$ ), рентгеновского источника Лебедь X-1 ( $\times$ ) [3]

После выгорания водорода в ядре начинается горение водорода в окружающем ядро слое, а затем последовательное горение гелия, углерода и других элементов. На этих стадиях происходит увеличение размеров и светимости звезды, в результате чего она перемещается по диаграмме Герцшпрунга — Рассела вправо и вверх. В области *красных гигантов* находятся звезды со слоевым источником энергии. На *горизонтальную ветвь* попадают звезды умеренных масс (около  $M_{\odot}$ ), в ядре которых горит гелий. На поздних стадиях эволюции звезды интенсивно теряют массу. После истощения всех источников термоядерной энергии звездный остаток в зависимости от его массы превращается в белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру.

Характеристики звезд различных типов приведены в табл. 45.16 и на рис. 45.19, 45.20.

**Двойные и кратные звезды.** На 100 звездных систем приходится 30 одиночных звезд, 47 двойных систем

**Переменные звезды.** Кроме *затменных переменных* звезд, которые представляют собой двойные системы, изменяющие свой блеск вследствие периодических затмений одного компонента другим, имеются различные типы физических переменных звезд. Среди них наиболее многочисленны *пульсирующие звезды* (табл. 45.17).

Для классических цефеид существует соотношение период — светимость [2]:

$$M_V = -1,67 - 2,54 \lg P, \quad M_B = -1,33 - 2,25 \lg P,$$

где  $M_V$  и  $M_B$  — абсолютные звездные величины соответственно в визуальной и голубой областях спектра;  $P$  — период, сут. Эта зависимость используется для определения расстояний до близких галактик.

**Катаклизмические переменные** [24, 25] (табл. 45.18) представляют собой тесные двойные системы (орбитальный период 1—10 ч), одним из компонентов кото-



Т а б л и ц а 45.16. Масса, радиус, светимость и средняя плотность в зависимости от спектрального класса звезды [1] (СГ — сверхгигант, Г — гигант, ГП — главная последовательность)

| Спектральный класс | $\lg (M/M_{\odot})$ |      |       | $\lg (R/R_{\odot})$ |      |       | $\lg (L/L_{\odot})$ |      |      | $\lg \bar{\rho} [\text{г/см}^3]$ |      |       |
|--------------------|---------------------|------|-------|---------------------|------|-------|---------------------|------|------|----------------------------------|------|-------|
|                    | СГ                  | Г    | ГП    | СГ                  | Г    | ГП    | СГ                  | Г    | ГП   | СГ                               | Г    | ГП    |
| O5                 | +2,2                | —    | +1,6  | —                   | —    | +1,25 | —                   | —    | +5,7 | —                                | —    | -2,0  |
| B0                 | +1,7                | —    | +1,25 | +1,3                | +1,2 | +0,87 | +5,4                | —    | +4,3 | -2,1                             | —    | -1,2  |
| B5                 | +1,4                | —    | +0,81 | +1,5                | +1,0 | +0,58 | +4,8                | —    | +2,9 | -2,9                             | —    | -0,78 |
| A0                 | +1,2                | —    | +0,51 | +1,6                | +0,8 | +0,40 | +4,3                | —    | +1,2 | -3,5                             | —    | -0,55 |
| A5                 | +1,1                | —    | +0,32 | +1,7                | —    | +0,24 | +4,0                | —    | +1,3 | -3,8                             | —    | -0,26 |
| F0                 | +1,1                | —    | +0,23 | +1,8                | —    | +0,13 | +3,9                | —    | +0,8 | -4,2                             | —    | -0,01 |
| F5                 | +1,0                | —    | +0,11 | +1,9                | +0,6 | +0,08 | +3,8                | —    | +0,4 | -4,5                             | —    | +0,03 |
| G0                 | +1,0                | +0,4 | +0,04 | +2,0                | +0,8 | +0,02 | +3,8                | +1,5 | +0,1 | -4,9                             | -1,8 | +0,13 |
| G5                 | +1,1                | +0,5 | -0,03 | +2,1                | +1,0 | -0,03 | +3,8                | +1,7 | -0,1 | -5,2                             | -2,4 | +0,20 |
| K0                 | +1,1                | +0,6 | -0,11 | +2,3                | +1,2 | -0,07 | +3,9                | +1,9 | -0,4 | -5,7                             | -2,9 | +0,25 |
| K5                 | +1,2                | +0,7 | -0,16 | +2,6                | +1,4 | -0,13 | +4,2                | +2,3 | -0,8 | -6,4                             | -3,4 | +0,38 |
| M0                 | +1,2                | +0,8 | -0,33 | +2,7                | —    | -0,20 | +4,5                | +2,6 | -1,2 | -6,7                             | -4   | +0,4  |
| M2                 | +1,3                | —    | -0,41 | +2,9                | —    | -0,3  | +4,7                | +2,8 | -1,5 | -7,2                             | —    | +0,7  |
| M5                 | —                   | —    | -0,67 | —                   | —    | -0,5  | —                   | +3,0 | -2,1 | —                                | —    | +1,0  |
| M8                 | —                   | —    | -1,0  | —                   | —    | -0,9  | —                   | —    | -3,1 | —                                | —    | +1,8  |

Т а б л и ц а 45.17. Пульсирующие переменные [23]

| Тип звезды                                         | Период      | Характерный период | Население | Спектральный класс | Абсолютная звездная величина |
|----------------------------------------------------|-------------|--------------------|-----------|--------------------|------------------------------|
| RR Лиры                                            | 1,5—24 ч    | 0,5 сут            | II        | A2—F2              | 0,0—1,0 <sup>m</sup>         |
| Классические цефеиды                               | 1—50 сут    | 5—10 сут           | I         | F6—K2              | -0,5÷-6 <sup>m</sup>         |
| W Девы                                             | 2—45 сут    | 12—20 сут          | II        | F2—G6 (?)          | 0÷-3 <sup>m</sup>            |
| RV Тельца                                          | 20—150 сут  | 75 сут             | II        | G, K               | -3 <sup>m</sup>              |
| Красные полуправильные переменные                  | 100—200 сут | 100 сут            | I и II    | (K), M, R, N, S    | -1÷-3 <sup>m</sup>           |
| Долгопериодические переменные                      | 100—700 сут | 270 сут            | I и II    | Me, Re, Ne, Se     | +1÷-2 <sup>m</sup>           |
| Типа $\beta$ Цефея ( $\beta$ Большого Пса)         | 4—6 ч       | 5 ч                | I         | B1—B2              | -3,5÷-4,5 <sup>m</sup>       |
| Карликовые цефеиды и переменные типа $\delta$ Щита | 1—3 ч       | 2 ч                | I         | A2—F5              | +2÷+3 <sup>m</sup>           |
| Цефеиды с биениями (двупериодические цефеиды)      | 1—7 сут     | 2 сут              | I (?)     | F0—G0 (?)          | -1÷-3 <sup>m</sup> (?)       |
| Переменные белые карлики (звезды типа ZZ Кита)     | 200—1000 с  | 500 с (?)          | I (?)     | A5—F5 (?)          | +10÷+15 <sup>m</sup> (?)     |

Т а б л и ц а 45.18. Типы катаклизмических переменных

| Тип                | Амплитуда изменения звездной величины при вспышке | Светимость в максимуме, Вт | Полная энергия вспышки, Дж         | Длительность вспышки, сут | Время между вспышками |
|--------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Классические новые | 9—>14 <sup>m</sup>                                | 10 <sup>31</sup>           | 10 <sup>38</sup> —10 <sup>39</sup> | 50—5000                   | ~10 <sup>3</sup> лет  |
| Повторные новые    | 7—9 <sup>m</sup>                                  | 10 <sup>31</sup>           | 10 <sup>35</sup> —10 <sup>36</sup> | 10—100                    | 10—100 лет            |
| Карликовые новые:  |                                                   |                            |                                    |                           |                       |
| типа U Блинецов    | 2—6 <sup>m</sup>                                  | 10 <sup>27</sup>           | 10 <sup>31</sup> —10 <sup>32</sup> | 10                        | 15—500 сут            |
| типа Z Жирафа      | 2—5 <sup>m</sup>                                  | 10 <sup>28</sup>           | 10 <sup>31</sup> —10 <sup>32</sup> | 10                        | 10—50 сут             |

Таблица 45.19. Некоторые новые звезды [1]

| Звезда       | Год<br>вспышки | Звездная величина |             |                  | Абсолютная<br>звездная ве-<br>личина в<br>максимуме | $t_s^*$ , сут | Орбитальный<br>период [26] |
|--------------|----------------|-------------------|-------------|------------------|-----------------------------------------------------|---------------|----------------------------|
|              |                | до вспышки        | в максимуме | после<br>вспышки |                                                     |               |                            |
| Т Возничего  | 1891           | > 13              | 4,0         | 14,8             | —6,2                                                | 120           | 4 ч 20 мин                 |
| ЖК Персея    | 1901           | 13,5              | 0,2         | 13,2             | —8,3                                                | 12            | 45 ч 20 мин                |
| V 603 Орла   | 1918           | 10,6              | —1,1        | 10,9             | —8,4                                                | 7             | 3 ч 20 мин                 |
| DQ Геркулеса | 1934           | 14,3              | 1,4         | 13,8             | —6,2                                                | 105           | 4 ч 39 мин                 |

\*  $t_s$  — время уменьшения блеска после максимума на  $3^m$ .

Таблица 45.20. Некоторые повторные новые звезды [1]

| Звезда               | Годы<br>вспышек        | Звездная<br>величина |                | Абсолютная<br>звездная ве-<br>личина в<br>максимуме | $t_s$ , сут | Орбитальный<br>период [26] |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------|-----------------------------------------------------|-------------|----------------------------|
|                      |                        | в мак-<br>симуе      | в мин-<br>муме |                                                     |             |                            |
| Т Северной<br>Короны | 1866,<br>1946          | 2,1                  | 10,6           | —8,1                                                | 6           | 230 сут                    |
| RS Змеенос-<br>ца    | 1898,<br>1933,<br>1958 | 4,3                  | 11,6           | —8,5                                                | 10          | —                          |
| WZ Стрелы            | 1913,<br>1946          | 7,3                  | 15,9           | —7,1                                                | 33          | 81,5 мин                   |
| U Скорпио-<br>на     | 1966,<br>1906,<br>1936 | 8,9                  | 17,6           | —7,6                                                | 6           | —                          |

рых является белый карлик, а другим — нормальная звезда. В результате неустойчивости, развивающейся при аккреции (перетекании вещества с нормальной звезды на белый карлик), происходят вспышки оптиче-

ского излучения. В случае классических новых звезд это тепловая неустойчивость, которая приводит к термоядерному взрыву водорода, накопившегося в результате аккреции на поверхности белого карлика. Катаклизмические переменные представляют собой рентгеновские источники (светимость  $10^{24}$ — $10^{26}$  Вт в спокойном состоянии).

Характеристики некоторых катаклизмических переменных приведены в табл. 45.19, 45.20.

К другим типам переменных звезд относятся следующие звезды.

**Звезды типа Т Тельца** [27, 28] — звезды массой 0,5—3  $M_\odot$ , еще не вышедшие на стадию главной последовательности. Они испытывают нерегулярные колебания блеска амплитудой до нескольких звездных величин. Относятся к спектральным классам от M до G с сильными эмиссионными линиями. Светимости составляют 0,3—30  $L_\odot$ . Скорость потери массы  $10^{-7}$ — $10^{-9} M_\odot/\text{год}$ .

**Звезды типа UV Кита** [1, 29] — вспыхивающие карликовые звезды спектрального класса M массой 0,1—0,5  $M_\odot$ . Вспышки происходят нерегулярно с характерной частотой около 1 сут $^{-1}$ . Время нарастания блеска — примерно 1 мин, длительность вспышки — около 20 мин, полная энергия вспышки — порядка  $10^{25}$  Дж.

Таблица 45.21. Характеристики некоторых радиопульсаров [36]

| Пулсар                                                      | Период P, с             | Время за-<br>медления<br>$P/\dot{P}$ ,<br>10 <sup>6</sup> лет | Эквивалент-<br>ная ширина<br>импульса на<br>частоте<br>400 МГц*1, мс | Плотность<br>потока на<br>частоте<br>400 МГц,<br>Яв | Расстояние,<br>кпк | Мера дис-<br>персии,<br>пк/см <sup>3</sup> | Скорость по-<br>тери энер-<br>гии*2, 10 <sup>25</sup> Вт | Примечание                                                                    |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| PSR 1937+24 [35]                                            | 1,5578·10 <sup>-3</sup> | 150                                                           | 0,125*3                                                              | —                                                   | 2,5                | —                                          | 40                                                       | —                                                                             |
| PSR 0531+21<br>(пульсар в Кра-<br>бовидной туман-<br>ности) | 0,0332                  | 0,0024                                                        | 1,9                                                                  | 480                                                 | 2,0                | 56,7                                       | 4600                                                     | Наблюдается пульсирующее излучение в оптическом, рентгеновском и γ-диапазонах |
| PSR 1913+16                                                 | 0,0590                  | 212                                                           | 10                                                                   | 12                                                  | 6,1                | 167                                        | 2·10 <sup>-2</sup>                                       | Входит в состав тесной двойной системы, $P_{\text{орб}} = 27906,98$ с         |
| PSR 0833—45<br>(пульсар в со-<br>звездии Паруса)            | 0,0892                  | 0,022                                                         | 1,7                                                                  | 5000                                                | 0,5                | 69,0                                       | 67                                                       | Наблюдается пульсирующее излучение в оптическом и γ-диапазонах                |
| PSR 1952+29                                                 | 0,4266                  | 8600                                                          | 13                                                                   | 20                                                  | 0,8                | 20                                         | 5·10 <sup>-6</sup>                                       | —                                                                             |
| PSR 1919+21                                                 | 1,3373                  | 32                                                            | 25                                                                   | 56                                                  | 0,5                | 12,4                                       | 2·10 <sup>-4</sup>                                       | —                                                                             |
| PSR 1845—19                                                 | 4,3081                  | 5,8                                                           | 66                                                                   | 15                                                  | 0,7                | 19,1                                       | 10 <sup>-4</sup>                                         | —                                                                             |

\*1 Энергия импульса, отнесенная к максимальной плотности потока.

\*2 Скорость потери энергии вращения  $I\dot{\Omega}$ , рассчитанная для характерного значения момента инерции нейтронной звезды  $I = 10^3$  кг·м<sup>2</sup>.

\*3 Ширина импульса на полувысоте.

Звезды типа R Северной Короны [1] — сверхгиганты спектральных классов F—K и R, испытывающие непериодические уменьшения блеска на 1—9<sup>m</sup> продолжительностью десятки и сотни дней.

Симбиотические звезды [30] — тесные двойные системы, состоящие из холодной и горячей звезд. Хаотически изменяют свой блеск на 1—3<sup>m</sup> за время порядка года (иногда — десятков лет).

Пекулярные звезды [3]. Перечислим некоторые из них.

Звезды Вольфа — Райе — звезды высокой светимости (порядка  $10^6 L_{\odot}$ ) с очень яркими и широкими эмиссионными линиями, отличаюся присутствием в спектрах одновременно линий высокоионизованных ионов ( $T \approx 10^5$  K) и сравнительно низкотемпературного континуума [ $T \approx (1 \div 2) \cdot 10^4$  K]. Представляют собой массивные (около  $10 M_{\odot}$ ) звезды на конечных стадиях эволюции, интенсивно теряющие массу ( $10^{-4}$ — $10^{-5} M_{\odot}$  в год) в виде мощного звездного ветра. Известно около 300 таких объектов в нашей и соседних галактиках.

Магнитные звезды обладают очень высокими ( $10^{-2}$ —1 Тл) магнитными полями. Все звезды этого типа отличаются аномальным химическим составом (по-видимому, только во внешних областях): занижено содержание гелия, тогда как содержание тяжелых элементов (Si, Cr, Mn, Sr, Eu, Gd и других) аномально велико. Избыток в среднем растет с увеличением атомного номера элемента, достигая  $10^4$ — $10^6$  для редкоземельных элементов. Магнитные звезды лежат на главной последовательности в интервале спектральных классов B—F. К ним принадлежит 10—15% звезд этой части диаграммы.

Сверхновые звезды [31]. Вспышка сверхновой происходит в результате коллапса звезды, в которой истощились запасы ядерного топлива. При этом выделяется

энергия порядка  $10^{44}$  Дж и значительная часть массы звезды выбрасывается в виде оболочки, расширяющейся со скоростью 10 000—20 000 км/с. Светимость в максимуме  $10^{35}$ — $10^{37}$  Вт (рис. 45.21). Частота вспышек сверхновых в Галактике составляет примерно 0,05 год<sup>-1</sup>.

Конечные стадии эволюции звезд [33]. Конечное состояние звезды после истощения ядерного топлива и сброса массы в ходе эволюции либо при вспышке сверхновой зависит от массы коллапсирующего остатка. Белые карлики представляют собой звезды, в которых сила тяжести уравновешивается давлением вырожденного электронного газа. Их излучение обеспечивается тепловой энергией, запасенной в их недрах. Масса белого карлика не может превысить значение (предел Чандрасекара)  $M = 1,46 (2/\mu)^2 M_{\odot}$ , где  $\mu = A/Z$  — молекулярная масса на электрон (для элементов в интервале He—Fe  $\mu \approx 2$ ). Радиусы белых карликов составляют  $10^6$ — $10^7$  м (рис. 45.22), светимости —  $(10^{-2}$ — $10^{-4}) L_{\odot}$ , центральные плотности — порядка  $10^9$  кг/м<sup>3</sup>. Зеемановское расщепление линий свидетельствует о наличии у ряда белых карликов магнитных полей с  $B = 10^2$ — $10^3$  Тл.

В интервале масс  $0,1 M_{\odot} < M < (2 \div 3) M_{\odot}$  равновесным состоянием является нейтронная звезда (рис. 45.23). Характерные параметры нейтронных звезд: радиус — около 10 км,  $B$  — до  $10^6$ — $10^9$  Тл, гравитаци-

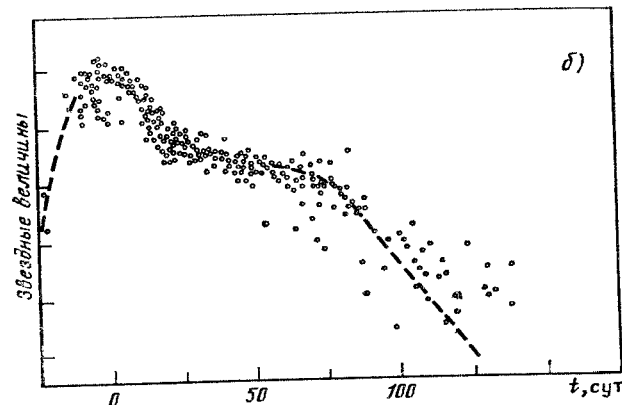
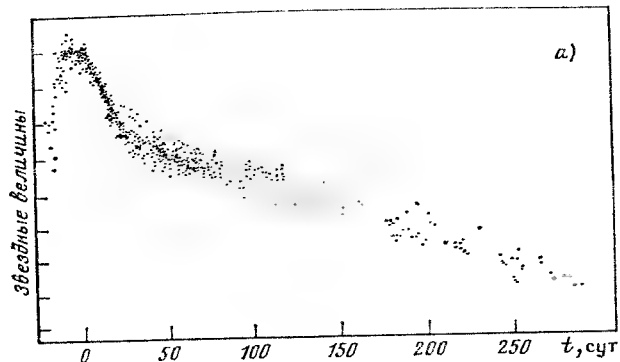


Рис. 45.21. Сводные кривые блеска сверхновых I (a) и II (б) типов [32]

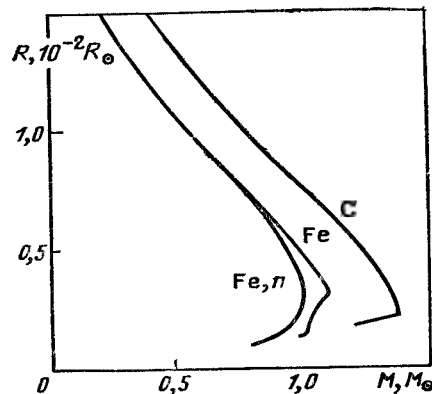


Рис. 45.22. Зависимость радиуса белого карлика от его массы. Приведены результаты расчетов для белых карликов, состоящих из углерода, железа с учетом нейтронизации [34]

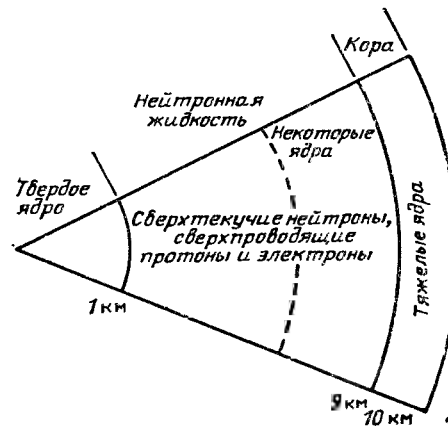


Рис. 45.23. Примерная схема строения нейтронной звезды [35]

онное красное смещение на поверхности  $\Delta\lambda/\lambda \approx 10\%$ , плотность в центре  $10^{17} - 10^{19}$  кг/м<sup>3</sup>, момент инерции — порядка  $10^{38}$  кг·м<sup>2</sup>. Верхняя граница массы нейтронных звезд определяется неизвестным уравнением состояния вещества при сверхвысоких плотностях, но она заведомо не превосходит  $3,2 M_{\odot}$ . Звездные остатки большей массы неизбежно коллапсируют в черные дыры.

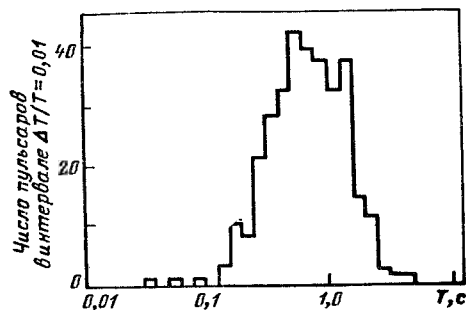


Рис. 45.24. Распределение периодов радиопульсаров [36]

Вращающиеся нейтронные звезды с сверхсильными магнитными полями могут проявлять себя как **радиопульсары** [35, 36] — мощные источники строго периодических импульсов радионизлучения, период которых совпадает с периодом вращения нейтронной звезды (табл. 45.21). Радионизлучение имеет степенной спектр (рис. 45.24). Источником энергии пульсара является энергия вращения нейтронной звезды, поэтому периоды всех пульсаров увеличиваются. Известно свыше 400 пульсаров.

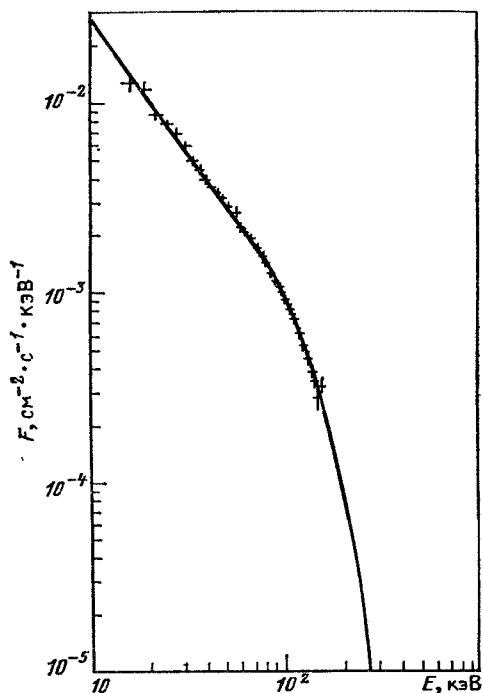


Рис. 45.25. Спектр рентгеновского излучения кандидата в черные дыры источника Лебедь X-1:

сплошная кривая — спектр излучения слоя плазмы с температурой  $T=27$  кэВ и оптической полутолщиной по томсоновскому рассеянию  $\tau=2$  [42]

Компактные звезды, входящие в состав тесных двойных систем, могут проявлять себя как **рентгеновские источники** [33]. Источником энергии служат аккреция вещества, перетекающего с нормальной звезды на компактную. Светимость аккрецирующих источников  $L$ , Вт, связана со скоростью аккреции  $\dot{m}$ ,  $10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ , соотношением

$$L = 6 \cdot 10^{31} \xi \dot{m}.$$

Для белых карликов  $\xi \approx 10^{-4}$ , для нейтронных звезд  $\xi = 0.1 \div 0.2$ , для черных дыр при дисковой аккреции

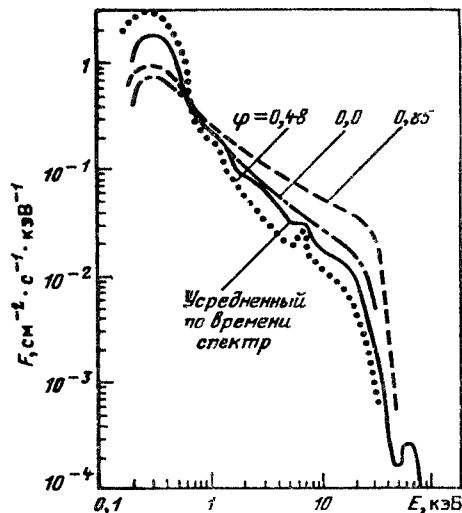


Рис. 45.26. Спектр излучения рентгеновского пульсара Геркулес X-1 в различных фазах  $\Phi$  периода пульсаций. Спектральная особенность вблизи  $E=7$  кэВ — результат флуоресценции железа. Особенность вблизи  $E=50$  кэВ соответствует циклотронной частоте электронов в магнитном поле с  $B=5 \cdot 10^8$  Тл [43]

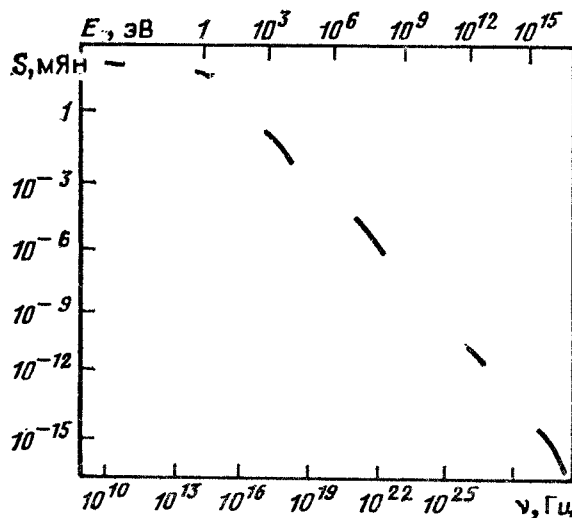


Рис. 45.27. Спектр излучения Лебедь X-3. Источник проявляет активность во всех диапазонах электромагнитных волн от радио- до  $\gamma$ -излучения сверхвысоких энергий. Входит в состав тесной двойной системы (орбитальный период 4,8 ч), находящейся на расстоянии 10 кпк [45]

Таблица 45.22. Рентгеновские источники — кандидаты в черные дыры

| Источник        | Рентгеновская светимость, $10^{30}$ Вт | Масса, $M_{\odot}$ | Нормальная звезда двойной системы | Орбитальный период двойной системы, сут | Расстояние, кпк |
|-----------------|----------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| Лебедь X-1 [38] | 4—6                                    | 8—11               | O9,7 I                            | 5,6                                     | 2,5             |
| LMC X-1 [39]    | 20                                     | $>3$               | O7                                | 3,9                                     | 50              |
| LMC X-3 [39]    | 20                                     | 7—14               | B3                                | 1,7                                     | 50              |

Таблица 45.23. Характеристики некоторых рентгеновских пульсаров [40, 41]

| Источник     | Рентгеновская светимость, $10^{30}$ Вт | Период пульсаций $P$ , с | Относительная скорость изменения периода $\dot{P}/P$ , лет $^{-1}$ | Орбитальный период двойной системы, сут | Расстояние, кпк |
|--------------|----------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|
| SMC X-1      | 50                                     | 0,71                     | $-6 \cdot 10^{-4}$                                                 | 3,89                                    | 50              |
| Геркулес X-1 | 2,5                                    | 1,24                     | $-3 \cdot 10^{-6}$                                                 | 1,7                                     | 5               |
| Центавр X-3  | 8—16                                   | 4,84                     | $-3 \cdot 10^{-4}$                                                 | 2,087                                   | 8               |
| X Персея     | $4 \cdot 10^{-4}$                      | 835                      | $-2 \cdot 10^{-4}$                                                 | $>40$                                   | 0,35            |
| Парус X-1    | 0,8—0,25                               | 283                      | $-2 \cdot 10^{-5}$                                                 | 8,97                                    | 1,4             |

$\xi \approx 0,06 \div 0,4$  (в зависимости от момента вращения черной дыры). Полной классификации рентгеновских источников нет. Выделяют отдельные типы источников.

При аккреции на нейтронную звезду с  $B > 10^6$  Тл вещество падает в район магнитных полюсов. Рентгеновское излучение нейтронной звезды модулируется ее вращением вокруг оси. Такие источники называют *рентгеновскими пульсарами*. Известно 20 рентгеновских пульсаров с периодами 0,1—1000 с.

*Барстеры* — рентгеновские источники, в которых на фоне стационарного рентгеновского излучения со светимостью порядка  $10^{29}$  Вт неперiodически с интервалом от нескольких часов до суток происходят всплески излучения. Время нарастания всплеска — около 1 с, время затухания — от 3 до 100 с, светимость в максимуме — порядка  $10^{31}$  Вт. Известно около 30 таких источников. Всплески происходят в результате термоядерных взрывов вещества, накопившегося при аккреции на поверхности нейтронной звезды.

*Транзиентные* (новоподобные) источники — системы, в которых аккреция происходит не постоянно; в результате источник то появляется, то исчезает с интервалом от нескольких месяцев до нескольких лет. Это может быть связано с эллиптичностью орбиты релятивистской звезды в двойной системе или с пульсациями нормальной звезды, что приводит к сильным колебаниям скорости аккреции. Среди транзитных источников есть рентгеновские пульсары и барстеры.

В табл. 45.22, 45.23 приведены параметры некоторых рентгеновских источников, а на рис. 45.25—45.27 — характерные спектры.

**Космические  $\gamma$ -всплески** характеризуются следующими параметрами [44] (см. также рис. 45.28):

- энергия, регистрируемая за весь всплеск.  $3 \cdot 10^{-9}$ — $1,5 \cdot 10^{-5}$  Дж/м $^2$ ;
- плотность потока энергии в максимуме  $5 \cdot 10^{-8}$ — $4 \cdot 10^{-7}$  Дж/(м $^2$ ·с);

длительность всплесков 0,1—100 с; число отдельных пиков во всплеске 1—5, иногда больше; время нарастания первого импульса  $10^{-5}$ —3 с.

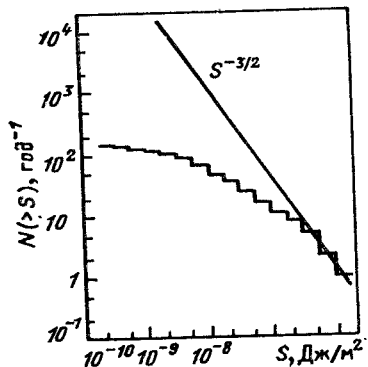


Рис. 45.28. Распределение частоты  $N$  появления  $\gamma$ -всплесков, интенсивность которых превосходит  $S$ : жирная прямая соответствует закону  $N(>S) \propto S^{-3/2}$ , который наблюдался бы, если бы источники всплесков были распределены в пространстве однородно и изотропно [44]

## 45.5. НАША ГАЛАКТИКА

**Параметры Галактики** [1, 3, 46, 47]. Наша Галактика представляет собой светящийся диск из звезд. Принадлежит к классу спиральных. В центре диска имеется утолщение — балдж, внутри которого находится компактное ядро Галактики. В диске выделяют плоскую составляющую — тонкий слой межзвездного газа и образующихся из него молодых звезд. Диск окружен сфероидальным гало из слабосветящихся старых звезд. Из динамических соображений [анализ кривой вращения (рис. 45.29) и устойчивости] следует, что Галактика должна быть окружена короной, содержащей основную часть массы системы. Непосредственно корона не наблюдается, поэтому она должна состоять из темной материи [маломассивные звезды низкой светимости, «мертвые» звездные остатки, нейтрино с ненулевой массой покоя (?)].

Ниже приведены параметры Галактики (см. также рис. 45.30—45.36, табл. 45.24):

- полная светимость  $5 \cdot 10^{36}$  Вт;
- величина которых меньше  $16,5^m$ ,  $(6 \div 8) \cdot 10^{10}$ ;
- количество звезд, абсолютная визуальная звездная величина которых меньше  $16,5^m$ ,  $(6 \div 8) \cdot 10^{10}$ ;
- период обращения Солнца вокруг ядра Галактика  $2,5 \cdot 10^8$  лет;
- возраст — примерно  $10^{10}$  лет;
- плотность энергии в диске Галактики;
- излучения звезд  $0,7 \cdot 10^{-13}$  Вт/м $^3$ ;
- турбулентных движений газа  $0,5 \cdot 10^{-13}$  Дж/м $^3$ ;
- реликтового излучения  $0,4 \cdot 10^{-13}$  Дж/м $^3$ ;
- космических лучей  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж/м $^3$ ;
- магнитного поля примерно  $10^{-13}$  Дж/м $^3$ ;
- суммарная плотность вещества в центральной плоскости Галактики в окрестностях Солнца, определяемая по теореме вириала [48],  $0,14 M_{\odot} / \text{пк}^3 = 8,8 \times 10^{-21}$  кг/м $^3$ ;
- плотность наблюдаемой звездной материи в окрестностях Солнца  $0,046 M_{\odot} / \text{пк}^3 = 3,0 \cdot 10^{-21}$  кг/м $^3$ ;
- плотность межзвездного газа в окрестностях Солнца  $0,03 M_{\odot} / \text{пк}^3 = 1,2 \cdot 10^{-21}$  кг/м $^3$ .

**Типы звездных населений** [1, 3]. Звезды и другие объекты в Галактике делятся на два типа. К населению I относятся объекты, образующие плоскую подсистему

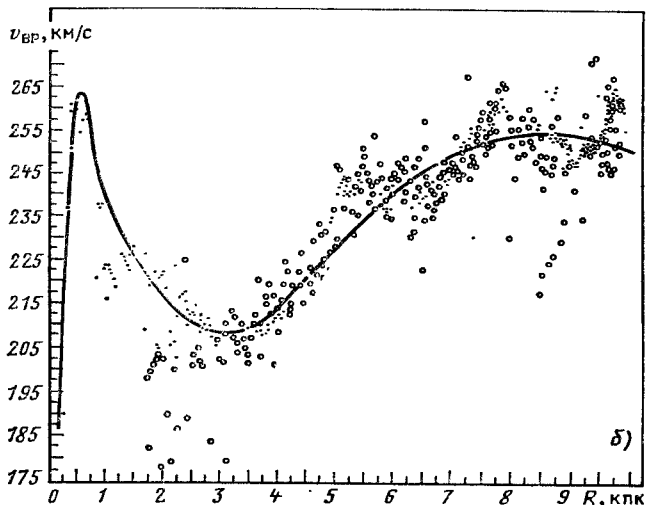
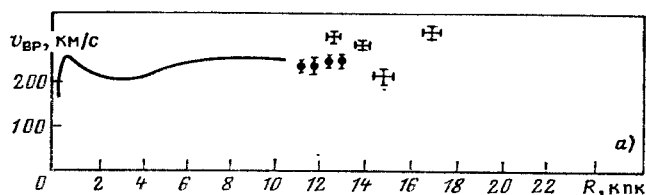


Рис. 45.29. Кривая вращения Галактики [46] (а) (б — более детальный масштаб)

Галактики: звезды в диске Галактики, межзвездный газ и пыль, диффузные туманности, рассеянные скопления. Возраст объектов населения I не превышает 10 млрд. лет. Население II составляют старые звезды (возраст около 10 млрд. лет), имеющие сферическое пространственное распределение и характеризующиеся низким содержанием металлов и высокими пространственными

скоростями. К населению II относятся шаровые скопления.

Звездные скопления [1, 3, 50, 51]. Полное число скоплений в Галактике — около 20 000.

Таблица 45.24. Размеры  $a_0$ , масса  $M$  и сплюснутость  $\varepsilon$  (отношение полуосей) подсистем Галактики

| Подсистема | $\varepsilon$ | $a_0$ , кпк | $M$ , $10^{10} M_{\odot}$ |
|------------|---------------|-------------|---------------------------|
| Ядро       | 0,6           | 0,005       | 0,009                     |
| Балдж      | 0,6           | 0,21        | 0,442                     |
| Диск*      | 0,1           | 4,62        | 7,68                      |
|            | 0,45          | 1,026       | —0,379                    |
| Плоская*   | 0,02          | 6,4         | 1,0                       |
|            | 0,025         | 5,12        | —0,64                     |
| Гало       | 0,3           | 1,9         | 1,2                       |
| Корона     | 1             | 75          | 110                       |

\* В плоской подсистеме и диске наблюдается понижение плотности в центральной части, поэтому для описания этих систем вводится дополнительная «отрицательная» масса.

Звездные ассоциации — группы из нескольких десятков или сотен молодых звезд. Имеют размер десятки парсек. Связаны с областями звездообразования. Выделяют О-ассоциации, в которых группируются горячие звезды спектральных классов О и В, и Т-ассоциации, включающие переменные звезды типа Т Тельца. Известно около 70 О-ассоциаций и 25 Т-ассоциаций.

Рассеянные звездные скопления (табл. 45.25) представляют собой группы из нескольких сотен или тысяч звезд. Их массы примерно равны  $10^3 M_{\odot}$ , размеры 1—10 пк. Эти скопления принадлежат к населению I. Известно примерно 1000 рассеянных скоплений. Звездные ассоциации и рассеянные скопления имеют содер-

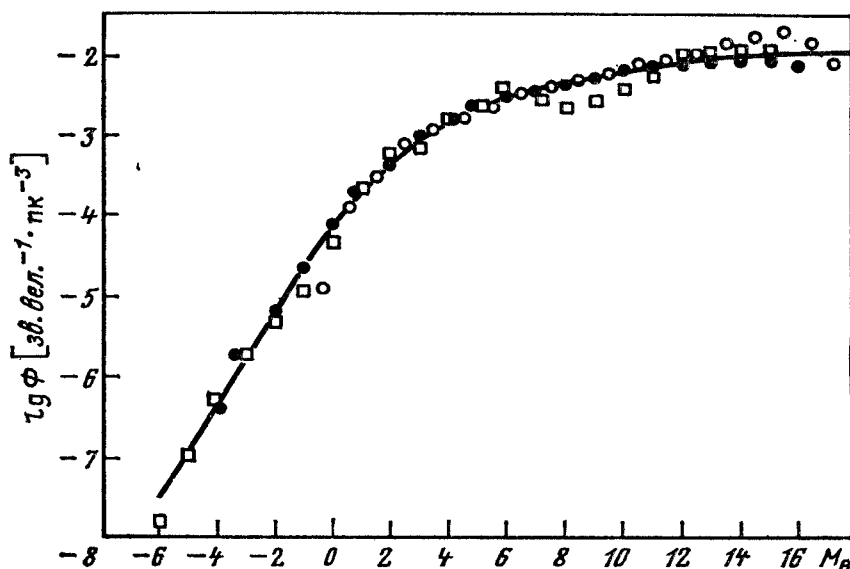


Рис. 45.30. Функция светности звезд в Галактике  $\Phi(M_B)$  (распределение звезд по абсолютным звездным величинам в полосе В [49])

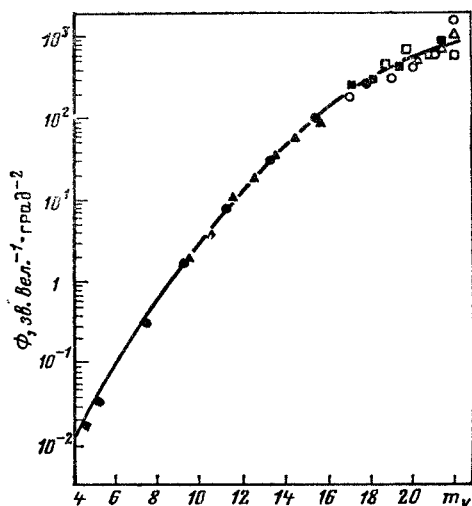


Рис. 45.31. Распределение звезд по визуальным звездным величинам в направлении на полюс Галактики [49]

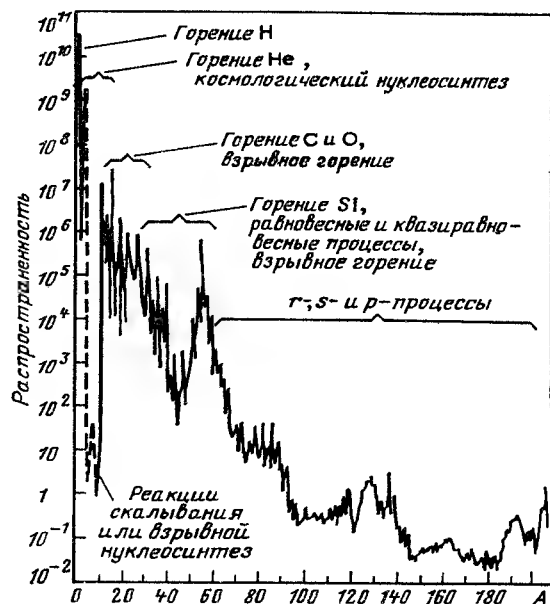


Рис. 45.32. Распространенность химических элементов: A — массовое число; указаны ядерные процессы в звездах, с которыми могут быть связаны особенности кривой распространенности [2]

жание тяжелых элементов, близкое к солнечному, и концентрируются к плоскости Галактики.

**Шаровые скопления** (табл. 45.26) представляют собой устойчивые образования, состоящие из  $10^5$ — $10^7$  звезд. Общее число шаровых скоплений в Галактике — около 500. Их возраст 10—18 млрд. лет, а содержание тяжелых элементов в 10—100 раз меньше, чем на Солнце. Шаровые скопления образуют сферическую систему и концентрируются к центру Галактики.

**Межзвездный газ** [52, 53]. Внутри него выделяют следующие области (см. также табл. 45.27): 1) гигантские молекулярные облака (их насчитывается около 4000), в которых содержится почти половина массы все-

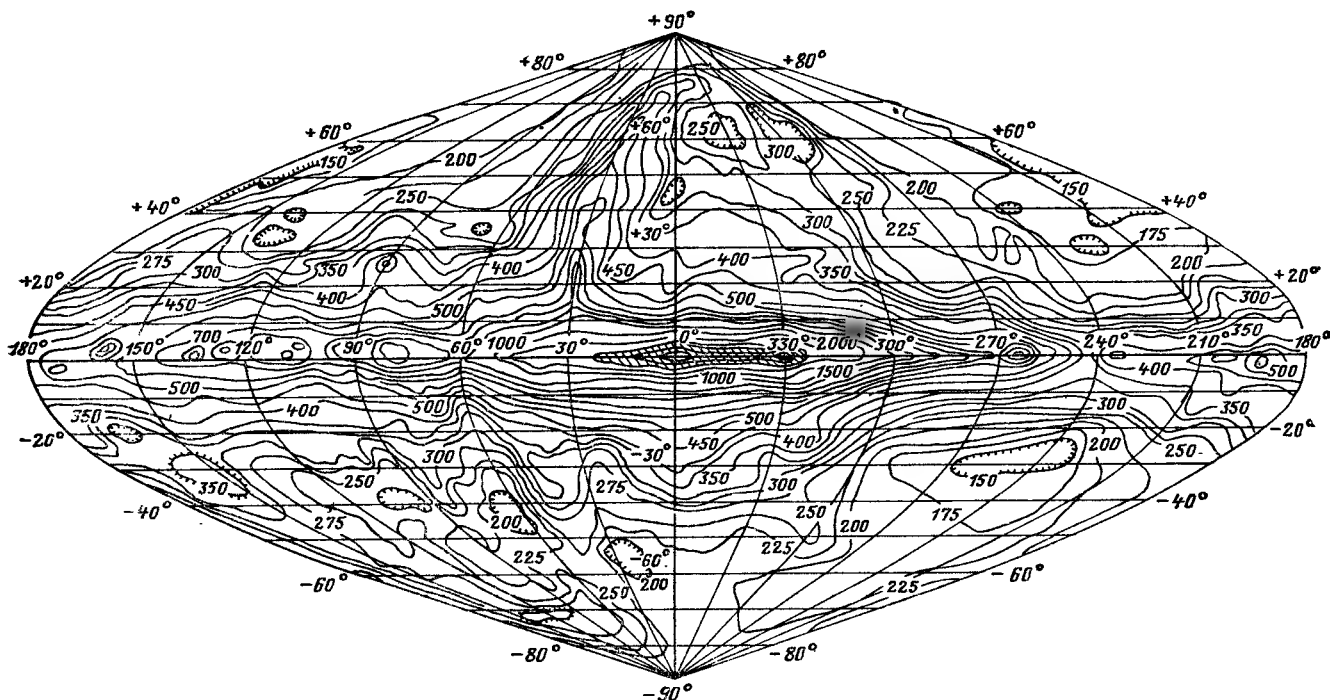


Рис. 45.33. Распределение яркости по небу на частоте 150 МГц в галактических координатах; цифры у изофот — яркостная температура излучения, К [54]

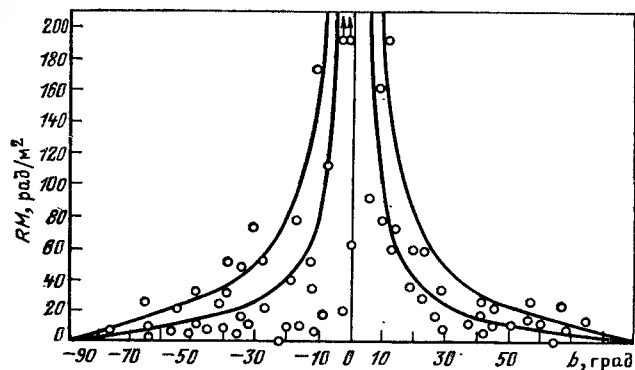


Рис. 45.34. Зависимость меры вращения  $RM$  внегалактических радионисточников от галактической широты. Фарадеевское вращение плоскости поляризации радиоизлучения  $\Delta\Phi = RM\lambda^2$  позволяет определить величину  $RM = 0,81 \int_0^l B_{\parallel} N_e dl$  рад/м², где  $B_{\parallel}$  — составляющая магнитной индукции вдоль луча зрения,  $10^{-10}$  Тл;  $N_e$  — плотность электронов, см $^{-3}$ ;  $l$  — расстояние до источника, пк [54]

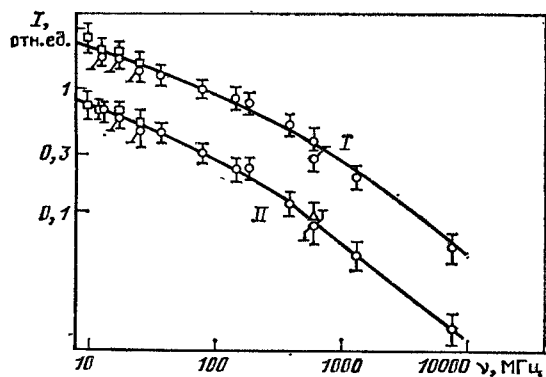


Рис. 45.35. Спектр радиоизлучения Галактики: I — излучение высокоширотных областей в направлении на антицентр; II — излучение спиральных рукавов [54]

го газа; 2) области нейтрального водорода (HI); 3) зоны ионизованного водорода (HII), которыми являются эмиссионные туманности вокруг горячих звезд; 4) коридоры горячего разреженного газа (коронального газа). В среднем по диску Галактики плотность межзвездного газа составляет 0,5—0,7 см $^{-3}$ . Толщина газового слоя 200—300 пк. К периферии Галактики (за пределами 12—15 кпк) она увеличивается и достигает нескольких килопарсек. Средняя концентрация электронов — примерно 0,03 см $^{-3}$ . Основная часть газа сосредоточена в спиральных рукавах. Значительная его часть находится в молекулярном состоянии (табл. 45.28). Полная масса газа в Галактике составляет  $(5\div 10) \cdot 10^9 M_{\odot}$ . Масса нейтрального водорода, определяемая по излучению в линии с  $\lambda = 21$  см, составляет  $(2\div 4) \cdot 10^9 M_{\odot}$ . Облака межзвездного газа помимо упорядоченного вращения вокруг центра Галактики движутся хаотически со скоростями около 10 км/с. Облака распределены по массам по закону: число облаков  $dN$ , масса которых лежит в интервале от  $M$  до  $M+dM$ , равно  $dN \propto M^{-3/2} dM$ . Межзвездное магнитное поле характеризуется индукцией  $(2\div 7) \cdot 10^{-10}$  Тл,

Таблица 45.25. Характеристики некоторых рассеянных скоплений

| Скопление | Расстояние, пк | Нижний предел массы, $lg(M/M_{\odot})$ | $lg N_5^*$ | Радиус ядра, пк | Радиус короны, пк | Возраст, $10^8$ лет |
|-----------|----------------|----------------------------------------|------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| Плеяды    | 134            | 2,6                                    | 2,2        | 2,6             | 8,1               | 0,5                 |
| Гиады     | 46             | 2,2                                    | 1,8        | 3,2             | 8,0               | —                   |
| Ясли      | 174            | 2,5                                    | 2,0        | 2,8             | 6,9               | 5                   |
| M67       | 830            | 3,0                                    | 2,7        | 1,8             | 12,6              | 33                  |

\* $N_5$  — число звезд ярче  $5^m$ .

Таблица 45.26. Характеристики некоторых шаровых скоплений

| Скопление | Диаметр ядра, пк | Расстояние, кпк | Интегральная видимая звездная величина | Масса, $10^4 M_{\odot}$ |
|-----------|------------------|-----------------|----------------------------------------|-------------------------|
| M5        | 12               | 8,5             | 5,9                                    | 6                       |
| M13       | 11               | 7,7             | 5,9                                    | 30                      |
| M92       | 10               | 10              | 6,5                                    | 14                      |
| M71       | 5                | 4,5             | 8,3                                    | —                       |

Таблица 45.27. Типичные параметры основных структурных компонентов межзвездного газа в спиральных ветвях Галактики [53]

| Фаза                              | Температура, К      | Плотность, см $^{-3}$ | Масса, $M_{\odot}$  | Размер, пк | Связанность (доля связанного объема) |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|------------|--------------------------------------|
| Корональный газ                   | $\sim 5 \cdot 10^5$ | $\sim 0,003$          | —                   | —          | $\sim 0,5$                           |
| Зоны HII низкой плотности         | $\sim 10^4$         | $\sim 3$              | —                   | —          | $\sim 0,01$                          |
| Теплые области HI                 | $\sim 10^3$         | $\sim 1$              | —                   | —          | $\sim 0,01$                          |
| Межоблачная среда                 | $\sim 10^4$         | $\sim 0,1$            | —                   | —          | $\sim 0,5$                           |
| Облака HI                         | $\sim 80$           | $\sim 10$             | $\sim 100$          | $\sim 10$  | $\sim 0,01$                          |
| Темные облака                     | $\sim 10$           | $\sim 10^3$           | $\sim 300$          | $\sim 1$   | $\sim 10^{-5}$                       |
| Большие глобулы                   | $\sim 10$           | $\sim 10^4$           | $\sim 20$           | $\sim 0,3$ | $3 \cdot 10^{-9}$                    |
| Области HII                       | $\sim 10^4$         | $\sim 30$             | $\sim 300$          | $\sim 10$  | $\sim 10^{-4}$                       |
| Гигантские молекулярные облака    | $\sim 20$           | $\sim 300$            | $\sim 3 \cdot 10^5$ | $\sim 40$  | $\sim 3 \cdot 10^{-4}$               |
| Уплотнения в молекулярных облаках | $\sim 6$            | $\sim 10^5$           | $\sim 100$          | $\sim 0,5$ | —                                    |



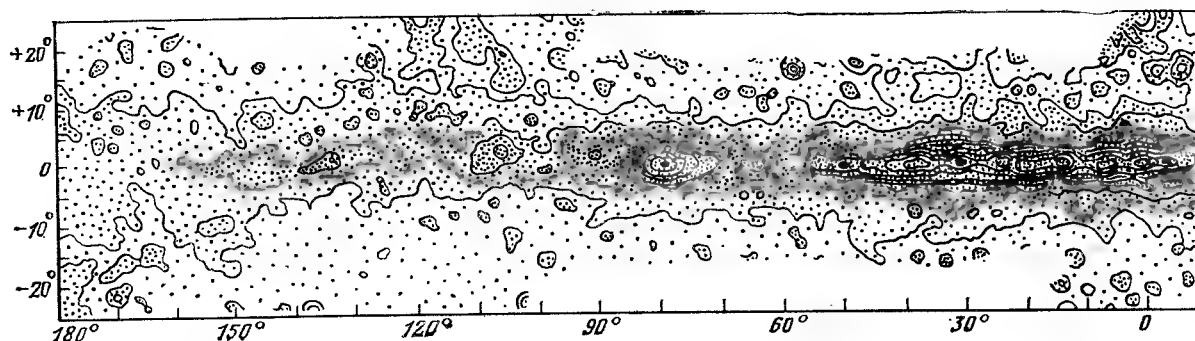


Рис. 45.36. Распределение  $\gamma$ -излучения (70 МэВ—5 ГэВ)

Межзвездный газ хорошо поглощает ионизирующее излучение. Это затрудняет наблюдения в ультрафиолетовом и длинноволновом рентгеновском диапазонах (рис. 45.37).

Таблица 45.28. Некоторые межзвездные молекулы [52, 55]

| Молекула   | Характерная длина волны, см | $\lg (N/N_H)$ |
|------------|-----------------------------|---------------|
| $H_2$      | —                           | 0             |
| CH         | 9,6                         | —8            |
| OH         | 18                          | —8            |
| CN         | 0,27                        | —8            |
| CO         | 0,26                        | —4            |
| SiO        | 0,23                        | —7            |
| CS         | 0,20                        | —7            |
| SO         | 0,30                        | —7            |
| SiS        | 0,22                        | —7            |
|            | 0,33                        | —7            |
|            | 0,27                        | —7            |
| $H_2O$     | 1,4                         | —7            |
| $C_2H$     | 0,34                        | —6            |
| HCN        | 0,34                        | —6            |
| $H_2S$     | 0,18                        | —8            |
| OCS        | 0,25                        | —8            |
| $NH_3$     | 1,3                         | —6            |
| $H_2CO$    | 6,2                         | —8            |
| $H_2CS$    | 11                          | —10           |
| $CH_3NH$   | 5,7                         | —10           |
| $HCOOH$    | 18                          | —10           |
| $CH_3C_2H$ | 0,35                        | —9            |

Туманности и остатки сверхновых. Планетарные туманности (табл. 45.29) [56] представляют собой сферические оболочки вокруг очень горячих ( $T \approx 3 \cdot 10^4 \div 10^5$  К) звезд, ультрафиолетовое излучение которых служит источником возбуждения атомов туманности. Планетарная туманность возникает, когда звезда на поздних стадиях эволюции сбрасывает верхние слои, образуя расширяющуюся оболочку.

Диффузные туманности бывают трех типов. Эмиссионные туманности (зоны HII) возникают вокруг горячих звезд, ультрафиолетовое излучение которых ионизует окружающий межзвездный газ. В отражательных туманностях межзвездная пыль подсвечивается яркими звездами более позднего спектрального класса (менее горячих), чем B2. В остатках вспышек сверхновых излучают нагретый ударной волной газ и релятивистские электроны (рис. 45.38).

Зависимость радиуса зоны HII  $R$ , пк, от плотности среды  $N$ ,  $cm^{-3}$ , и типа возбуждающей звезды имеет вид [1]

$$R = S_0 N^{-2/3},$$

где  $S_0$  определяется по спектральному классу звезды:

|                 |     |    |    |    |    |    |
|-----------------|-----|----|----|----|----|----|
| класс . . . . . | O5  | O8 | B0 | B2 | B5 | A0 |
| $S$ . . . . .   | 100 | 65 | 35 | 15 | 3  | 1  |

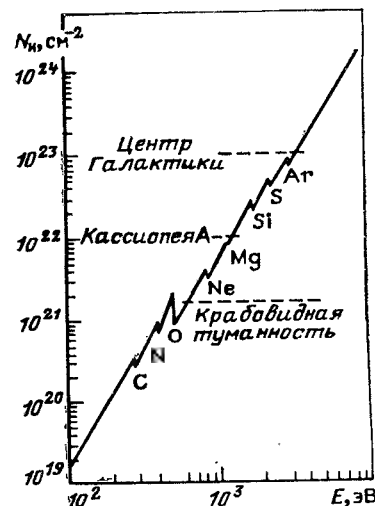
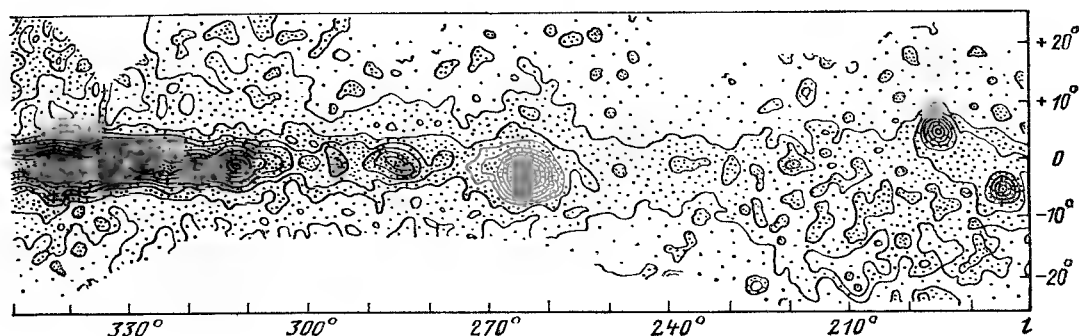


Рис. 45.37. Поглощение рентгеновского излучения межзвездным газом. Приведено число атомов водорода  $N_H$  на луче зрения, при котором оптическая толщина равна единице для данного значения энергии фотона  $E$  [52]

Благодаря малой плотности газа зоны HII интенсивно излучают в запрещенных линиях (табл. 45.30).

Параметры некоторых диффузных туманностей приведены в табл. 45.31, 45.32 (см. также рис. 45.39).

Межзвездные мазеры [59]. В отдельных плотных образованиях межзвездного газа, расположенных рядом с сильными источниками возбуждения, может возникать мазерное излучение. Наблюдаются мазеры на вращательных переходах молекул OH,  $H_2O$ , SiO и  $CH_3OH$  (табл. 45.33). Различают мазеры, связанные с холодными звездами больших размеров, излучающими в инфракрасном диапазоне (табл. 45.34), и мазеры,



по небу в галактических координатах [54]

Т а б л и ц а 45.29. Характеристики некоторых планетарных туманностей [1]

| Туманность | Плотность потока в линии $H\beta$ , $10^{-16}$ Вт/м <sup>2</sup> | Температура, $10^3$ К | Температура центральной звезды, $10^3$ К | $\lg N$ [см <sup>-3</sup> ] | Диаметр, пк | Масса, $M_{\odot}$ | Плотность потока на частоте 1 ГГц, Ян | Спектральный индекс радионизлучения* | Скорость расширения, км/с | Расстояние, пк |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|-----------------------------|-------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------|
| IC 418     | 800                                                              | 12                    | 36                                       | 4,1                         | 0,09        | 0,04               | 0,66                                  | +0,9                                 | 0                         | 1500           |
| NGC 3242   | 300                                                              | 14                    | 50                                       | 3,0                         | 0,1         | 0,04               | 0,90                                  | 0,0                                  | 20                        | 800            |
| NGC 6572   | 800                                                              | 11                    | 50                                       | 4,0                         | 0,05        | 0,10               | 0,24                                  | +2,0                                 | 4                         | 900            |
| NGC 6720   | 320                                                              | 10                    | 90                                       | 3,0                         | 0,2         | 0,17               | 0,44                                  | +0,1                                 | 19                        | 700            |
| («Кольцо») |                                                                  |                       |                                          |                             |             |                    |                                       |                                      |                           |                |
| NGC 7009   | 280                                                              | 12                    | 50                                       | 4,0                         | 0,08        | 0,09               | 0,52                                  | +0,8                                 | 19                        | 700            |
| («Сатурн») |                                                                  |                       |                                          |                             |             |                    |                                       |                                      |                           |                |
| NGC 7662   | 250                                                              | 14                    | 60                                       | 3,9                         | 0,06        | 0,07               | 0,07                                  | 0,0                                  | 25                        | 900            |

\* Спектральный индекс  $d \lg$  (интенсивность)/ $d \lg$  (частота).

Т а б л и ц а 45.30. Коэффициенты вероятностей  $A$  спонтанных переходов для некоторых запрещенных линий, наблюдаемых в туманностях [57]

| Переход         | O III           |                       | N II            |                       | OI              |                       |
|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
|                 | Длина волны, нм | $A$ , с <sup>-1</sup> | Длина волны, нм | $A$ , с <sup>-1</sup> | Длина волны, нм | $A$ , с <sup>-1</sup> |
| $^3P_2 - ^1D_2$ | 500,684         | 0,021                 | 658,34          | 0,0030                | 630,023         | 0,0069                |
| $^3P_1 - ^1D_2$ | 495,891         | 0,0071                | 654,81          | 0,00103               | 636,388         | 0,0022                |
| $^3P_0 - ^1D_2$ | 493,10          | $1,9 \cdot 10^{-6}$   | 652,74          | $4,2 \cdot 10^{-7}$   | 639,2           | $1,1 \cdot 10^{-6}$   |
| $^1D_2 - ^1S_0$ | 436,321         | 1,6                   | 575,48          | 1,08                  | 557,735         | 1,28                  |

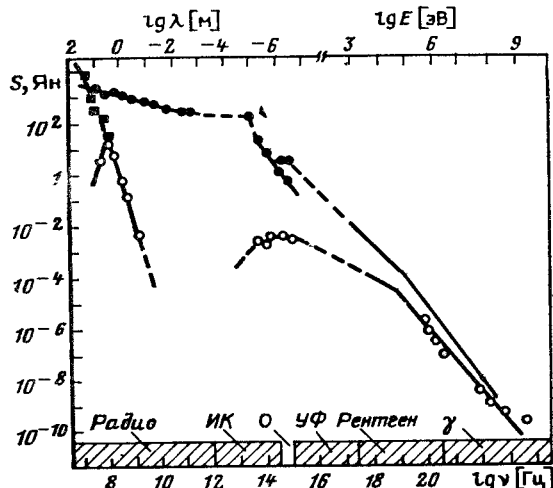
связанные с областями НII вокруг молодых горячих звезд (табл. 45.35).

Межзвездная пыль и поглощение света звезд [1, 61]. Приведем параметры межзвездной пыли и характеристики поглощения в межзвездном пространстве:

масса пылинок — около  $10^{-13}$  г;  
размер пылинок  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  см;  
концентрация пылинок — порядка  $10^{-12}$  см<sup>-3</sup>;  
плотность поглощающего вещества в межзвездном пространстве  $10^{-22}$  кг/м<sup>3</sup> =  $0,0015 M_{\odot}$ /пк<sup>3</sup>;  
поглощение света звезд вблизи галактической плос-

кости в окрестностях Солнца характеризуется величиной  $A_V = 1,9$  зв. вел./кпк.

Зависимость поглощения от длины волны излучения приводит к покраснению света звезд, которое характеризуется избытком цвета  $E(\lambda_1, \lambda_2)$ , представляющим собой разность поглощений на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , выраженных в звездных величинах (рис. 45.40). В качестве стандартных значений  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  принимают центры полос  $B$  и  $V$ . Соответствующий избыток цвета



обозначается  $E_{B-V}$ . Для перехода от избытка цвета к абсолютному значению поглощения служит множитель

$$R = A_V / E_{B-V}.$$

В среднем  $R$  равен 3,1, но в темных облаках (табл. 45.36) может составлять 5—6.

Рис. 45.38. Спектры Крабовидной туманности (темные кружки), ее пульсара (светлые кружки) и компактного радионисточника в центре туманности (квадратики) [32]. Обозначение диапазонов то же, что на рис. 45.7

Т а б л и ц а 45.31. Характеристики некоторых эмиссионных (Е) и отражательных (С) туманностей [1]

| Туманность                        | Тип | Расстояние, пк   | Диаметр, пк | Масса газа, $M_{\odot}$ | Плотность, $\text{см}^{-3}$ | Плотность потока излучения в $H_{\alpha}$ , $10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ | Плотность потока радионизлучения ( $\lambda=20 \text{ см}$ ), Ян | Класс возбуждающей звезды |
|-----------------------------------|-----|------------------|-------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| В звездном скоплении Плеяды (M45) | С   | 126              | 1,5         | —                       | —                           | —                                                                                             | —                                                                | B7                        |
| В созвездии Орион (M42)           | Е   | 460              | 5           | 300                     | 600                         | 13                                                                                            | 440                                                              | O8                        |
| «Конская голова»                  | СЕ  | 350              | 3           | 0,6                     | 25                          | —                                                                                             | —                                                                | B1                        |
| «Тарантул»                        | Е   | $5 \cdot 10^4$   | 250         | $10^5$                  | —                           | —                                                                                             | —                                                                | Группа звезд класса О     |
| «Розетка»                         | Е   | $1,1 \cdot 10^3$ | 15          | $9 \cdot 10^3$          | 30                          | 1,8                                                                                           | 300                                                              | O6                        |
| «Лагуна» (M8)                     | Е   | $1,2 \cdot 10^3$ | 9           | $10^3$                  | 80                          | 7                                                                                             | 380                                                              | O5                        |
| «Северная Америка»                | СЕ  | 700              | 20          | $8 \cdot 10^3$          | 15                          | 0,8                                                                                           | 510                                                              | A2                        |
| «Кокон»                           | С   | $1,6 \cdot 10^3$ | 2           | 7                       | 70                          | —                                                                                             | —                                                                | B1                        |
| «Трехраздельная» (M20)            | Е   | $10^3$           | 4           | 150                     | 100                         | 6                                                                                             | 30                                                               | O7                        |

Т а б л и ц а 45.32. Характеристики остатков сверхновых [58]

| Название остатка (год вспышки) | Расстояние, кпк | Диаметр, пк | Возраст на 1980 г., лет | Радионизлучение                                 |                     | Рентгеновое излучение             |                               | Оценка средней скорости расширения, км/с |
|--------------------------------|-----------------|-------------|-------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|
|                                |                 |             |                         | Плотность потока ( $\nu=1000 \text{ МГц}$ ), Ян | Спектральный индекс | Светимость*, $10^{28} \text{ Вт}$ | Температура, $10^6 \text{ К}$ |                                          |
| Кассиопея А (1680)             | 3               | 3,5         | 300                     | 3100                                            | —0,8                | 33                                | 15 и 60                       | 5500                                     |
| Сверхновая Кеплера (1604)      | 10              | 6,6         | 376                     | 20                                              | —0,6                | 30                                |                               |                                          |
| Сверхновая Браге (1572)        | 5               | 10,7        | 408                     | 52                                              | —0,6                | 17                                | 6 и 40                        | 5000                                     |
| Сверхновая 1181                | 8               | 12          | 799                     | 35                                              | —0,1                | Не обнаружено                     |                               | 1200                                     |
| Крабовидная туманность (1054)  | 2               | 3           | 926                     | 1000                                            | —0,2                | 310                               |                               |                                          |
| Сверхновая 1006                | 4               | 40          | 974                     | 25                                              | —0,6                | 0,2                               | 20                            | 1800                                     |
| Сверхновая 185                 | 2,5             | 28          | 1795                    | 33                                              | —0,4                | 17                                | 6                             | 600                                      |
| IC 443                         | 1,5             | 20          | 3400                    | 180                                             | —0,5                | 1                                 | 17                            | 800                                      |
| Корма А                        | 2,2             | 20          | 5000                    | 145                                             | —0,4                | 60                                | 7                             | 700                                      |
| Парус Х                        | 0,5             | 30          | 13 000                  | 1800                                            | —0,3                | 5                                 | 4                             | 500                                      |
| Петля в созвездии Лебедя       | 0,8             | 30          | 20 000                  | 160                                             | —0,5                | 16                                | 3                             | 400                                      |
| HB21                           | 1,1             | 35          | >35 000                 | 225                                             | —0,4                | 1                                 | <2                            | <200                                     |

\* В диапазоне 0,2—10 кэВ.

Таблица 45.33. Параметры наблюдаемых мазерных переходов

| Молекула           | Переход                               | Частота $\nu$ , МГц | Длина волны $\lambda$ , см | $A$ , с <sup>-1</sup> |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|
| OH                 | $^2\Pi_{3/2} J=3/2 F=1 \rightarrow 2$ | 1612,231            | 18,6                       | $1,29 \cdot 10^{-11}$ |
|                    | $^2\Pi_{3/2} J=3/2 F=1 \rightarrow 1$ | 1665,402            | 18,0                       | $7,11 \cdot 10^{-11}$ |
|                    | $^2\Pi_{3/2} J=3/2 F=2 \rightarrow 2$ | 1667,359            | 18,0                       | $7,11 \cdot 10^{-11}$ |
|                    | $^2\Pi_{3/2} J=3/2 F=2 \rightarrow 1$ | 1720,530            | 17,4                       | $9,42 \cdot 10^{-12}$ |
|                    | $^2\Pi_{3/2} J=5/2 F=2 \rightarrow 2$ | 6030,747            | 5,0                        | $1,53 \cdot 10^{-9}$  |
|                    | $^2\Pi_{3/2} J=5/2 F=3 \rightarrow 3$ | 6035,092            | 5,0                        | $1,57 \cdot 10^{-9}$  |
|                    | $^2\Pi_{1/2} J=1/2 F=0 \rightarrow 1$ | 4660,242            | 6,4                        | $1,08 \cdot 10^{-9}$  |
|                    | $^2\Pi_{1/2} J=1/2 F=1 \rightarrow 0$ | 4765,562            | 6,3                        | $3,86 \cdot 10^{-10}$ |
|                    | $^2\Pi_{3/2} J=7/2 F=4 \rightarrow 4$ | 13441,371           | 2,2                        | $9,26 \cdot 10^{-9}$  |
| H <sub>2</sub> O   | $6_{16} \rightarrow 5_{23}$           | 22235,080           | 1,35                       | $1,91 \cdot 10^{-9}$  |
| SiO                | $^1\Sigma v=1, J=1 \rightarrow 0$     | 43122,03            | 0,70                       | $3,00 \cdot 10^{-6}$  |
|                    | $v=1, J=2 \rightarrow 1$              | 86243,27            | 0,35                       | $2,87 \cdot 10^{-5}$  |
|                    | $v=1, J=3 \rightarrow 2$              | 129363,12           | 0,23                       | $1,04 \cdot 10^{-4}$  |
|                    | $v=2, J=1 \rightarrow 0$              | 42820,48            | 0,70                       | $2,93 \cdot 10^{-6}$  |
| CH <sub>3</sub> OH | $J=4 k=2 \rightarrow 1$               | 24933,468           | 1,20                       | $8,40 \cdot 10^{-8}$  |
|                    | $5 k=2 \rightarrow 1$                 | 25959,080           | 1,20                       | $8,74 \cdot 10^{-8}$  |
|                    | $6 k=2 \rightarrow 1$                 | 25018,123           | 1,20                       | $8,98 \cdot 10^{-8}$  |
|                    | $7 k=2 \rightarrow 1$                 | 25124,873           | 1,20                       | $9,21 \cdot 10^{-8}$  |
|                    | $8 k=2 \rightarrow 1$                 | 25294,411           | 1,20                       | $9,48 \cdot 10^{-8}$  |

Таблица 45.34. Характеристики мазеров, связанных со звездами, излучающими в инфракрасном диапазоне

| Величина                                   | H <sub>2</sub> O  | OH                 | SiO               |
|--------------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Число наблюдаемых переходов                | 1                 | 3                  | 4                 |
| Число известных объектов                   | ~50               | ~50                | 16                |
| Ширина линии, км/с                         | 1—2               | 1—2                | 0,5—2             |
| Кинетическая температура <sup>*1</sup> , К | 400—1600          | 400—1600           | 250—3500          |
| Число спектральных деталей                 | 1—10              | 2—10 <sup>*2</sup> | 1—10              |
| Диапазон скоростей, км/с                   | 5—50              | 5—80               | 2—15              |
| Поляризация                                | Нет               | Мала               | Нет (?)           |
| Время жизни деталей, с                     | $>10^7$           | $>10^7$            | —                 |
| Размер пятен, см                           | $10^{14}$         | $10^{15}$          | $<10^{16}$        |
| Яркая температура, К                       | $10^{11}—10^{12}$ | $10^9—10^{11}$     | $>10^3$           |
| Размер группы источников, см               | $10^{15}$         | $2 \cdot 10^{15}$  | —                 |
| Мощность, Вт <sup>*3</sup>                 | $10^{17}—10^{21}$ | $10^{17}—10^{21}$  | $10^{19}—10^{20}$ |

<sup>\*1</sup> Определяется по ширине линий в предположении, что нет сужения линий и крупномасштабных движений газа.

<sup>\*2</sup> Больше у сверхгигантов.

<sup>\*3</sup> В предположении изотропного излучения.

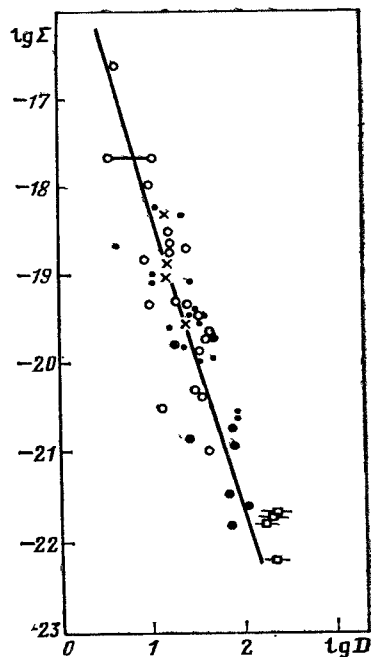


Рис. 45.39. Зависимость радиояркости  $\Sigma$ , Вт/(м<sup>2</sup>·Гц·ср), на частоте 1 ГГц от диаметра  $D$ , пк, остатка сверхновой [59]

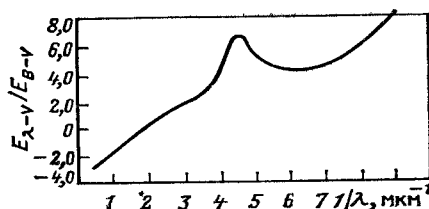


Рис. 45.40. Нормированная кривая межзвездного поглощения [52]

Отношение масс пыли и газа в разных облаках одинаково и равно примерно  $10^{-2}$ . Связь числа атомов Н на луче зрения  $N_H$ , см<sup>-2</sup>, с избытком цвета  $E_{B-v}$  дается выражением

$$N_H = 5,9 \cdot 10^{21} E_{B-v}.$$

Газово-пылевые комплексы и звездообразование [3, 52]. Значительная часть межзвездного газа в спиральных рукавах собрана в газово-пылевые комплексы размером десятки и сотни парсек. В них вкраплены плотные ( $n \approx 10^3$  см<sup>-3</sup>) холодные ( $T \approx 10$  К) молекулярные облака, в которых газ конденсируется в звезды (рис. 45.41). Молодые горячие звезды образуют вокруг себя компактные зоны Н II [62] размером 0,1—1 пк, плотностью  $10^3—10^6$  см<sup>-3</sup> и массой  $10^{-2}—1 M_\odot$ ,

Т а б л и ц а 45.35. Характеристики мазеров, связанных с областями НН

| Величина                      | H <sub>2</sub> O                   | ОН                                         | SiO                | CH <sub>3</sub> OH |
|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Число наблюдаемых переходов   | 1                                  | 9                                          | 4                  | 4                  |
| Число известных объектов      | ~50                                | ~50                                        | 1*1                | 1*1                |
| Ширина линии, км/с            | 0,5—2                              | 0,1—1                                      | 2                  | 0,5                |
| Кинетическая температура, К*2 | 100—1500                           | 4—400                                      | 3500               | 150                |
| Число спектральных деталей    | 1—100                              | 1—50                                       | 5                  | 3                  |
| Диапазон скоростей, км/с      | 1—300                              | 1—30                                       | 25                 | 4                  |
| Поляризация, %                | 0—10<br>(линейная)                 | 0—100<br>(линейная)<br>0—100<br>(круговая) | 0—20<br>(круговая) | Нет                |
| Время жизни деталей, с*3      | 10 <sup>6</sup> —10 <sup>7</sup>   | 10 <sup>7</sup> —10 <sup>8</sup>           | —                  | —                  |
| Размер пятен, см              | 10 <sup>13</sup> —10 <sup>14</sup> | 10 <sup>14</sup> —10 <sup>15</sup>         | < 10 <sup>16</sup> | < 10 <sup>16</sup> |
| Яркостная температура, К      | 10 <sup>13</sup> —10 <sup>15</sup> | 10 <sup>12</sup> —10 <sup>13</sup>         | > 10 <sup>13</sup> | > 10 <sup>3</sup>  |
| Размер группы источников, см  | 10 <sup>16</sup> —10 <sup>17</sup> | 10 <sup>16</sup> —10 <sup>17</sup>         | —                  | 10 <sup>17</sup>   |
| Мощность, Вт*4                | 10 <sup>20</sup> —10 <sup>26</sup> | 10 <sup>20</sup> —10 <sup>23</sup>         | 10 <sup>22</sup>   | 10 <sup>20</sup>   |

\*1 Единственный известный источник — Орнон А.

\*2 В предположении, что нет сужения линий и крупномасштабных движений газа.

\*3 Имеется несколько случаев, когда характерное время меньше.

\*4 В предположении изотропного излучения.

Т а б л и ц а 45.36. Статистические свойства пылевых облаков [61]

| Характеристика                              | Стандартное облако | Большое облако |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------|
| Среднее значение $E_{B-V}$ на облаке, $E_0$ | 0,061 (6)          | 0,29 (6)       |
| $k$ — число облаков на расстоянии 1 кпк     | 6,2 (3)            | 0,8 (2)        |
| Селективное поглощение на 1 кпк, $kE_0$     | 0,38 (5)           | 0,23 (1)       |

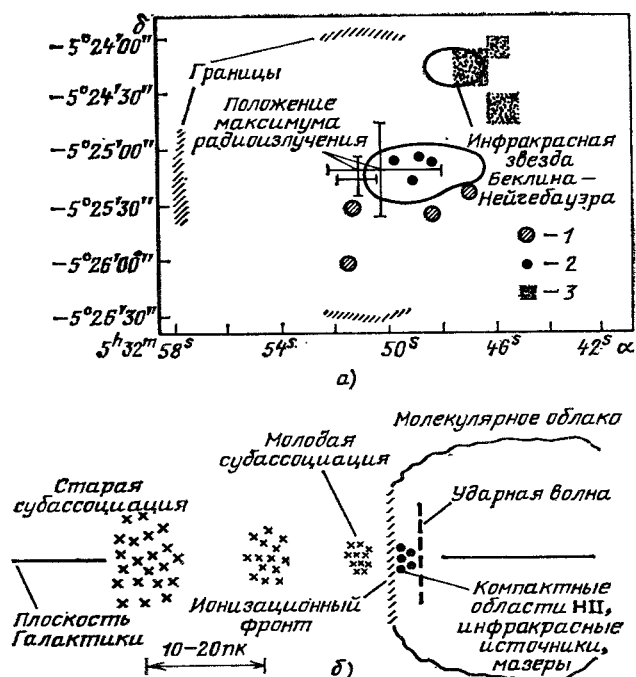


Рис. 45.41. Схема очага звездообразования, связанного с туманностью Ориона, (а) и типичная схема крупного очага звездообразования с бегущей по нему волной звездообразования (б) [53]:

1 — компактные зоны НН; 2 — звезды Трапеции Ориона; 3 — H<sub>2</sub>O-мазеры; сплошной линией очерчены инфракрасные туманности

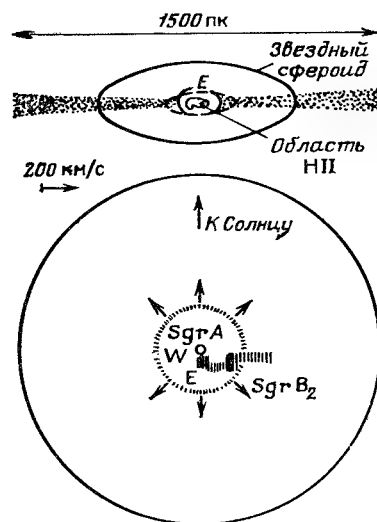


Рис. 45.42. Центр Галактики. Показаны положение радиоисточников Стрелец В2 и Стрелец А (с компонентами W и E) и расширяющееся молекулярное кольцо [64]

которые в свою очередь окружены непрозрачной оболочкой из пыли и газа. Эти оболочки переизлучают коротковолновое излучение центральной звезды в инфракрасном диапазоне (светимость  $10^2$ — $10^5 L_\odot$ ). Из молодых звезд происходит интенсивное истечение вещества, в котором возникают плотные ( $n \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$ ) образования, движущиеся со скоростями около 100 км/с, — объекты Хербиа — Аро [63]. Их температура — порядка  $10^4 \text{ К}$ , светимости (в основном эмиссионные линии)  $1$ — $10^3 L_\odot$ . С областями звездообразования связаны мазерные источники. Скорость звездообразования в Галактике  $4 M_\odot/\text{год}$ . Вновь образовавшиеся звезды распределены по массам по закону: число звезд  $dN$  в интервале масс от  $M$  до  $M+dM$  равно  $dN = \psi(M)dM$ , где  $\psi(M) = AM^{-3.5}$  (функция Солпитера). Эта аппроксимация действует в области  $0,3 M_\odot < M < 50 M_\odot$ .

**Центр Галактики** [64, 65]. Межзвездное поглощение в направлении на центр Галактики превышает  $27^m$ , поэтому наблюдать его можно только в радио-, инфракрасном или рентгеновском и  $\gamma$ -диапазонах. В центре Галактики расположены звездный сфероид массой около  $10^{10} M_\odot$ , а также вращающийся со скоростью 200 км/с газовый диск, состоящий из молекулярного и атомарного водорода (рис. 45.42). Центральная протяженная зона НII имеет вид сфероида радиусом около 150 пк и массой около  $10^6 M_\odot$ .

Непосредственно в центре расположен радиоисточник Стрелец А Западный (Sgr AW). Его размер — менее  $10^{13} \text{ м}$ , мощность  $3 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ . Полная инфракрасная светимость пыли в центральной области радиусом 1 пк составляет  $2 \cdot 10^6 L_\odot$ . Для поддержания ионизации газа в центральной области и нагрева пыли, ответственной за инфракрасное излучение, мощность ионизирующего излучения центрального источника должна составлять  $(1 \div 3) \cdot 10^7 L_\odot$ . Анализ распределения скоростей газа показывает, что в центральной области размером 1 пк сосредоточена масса примерно  $10^6 M_\odot$ . В направлении на центр зарегистрирован источник излучения в  $\gamma$ -линии 511 кэВ, соответствующей  $e^+ e^-$ -аннигиляции. Мощность, излучаемая в линии, меняется за времена порядка  $1/2$  года и достигает  $2 \cdot 10^{30} \text{ Вт}$ . Ширина линии — менее  $(1,6^{+0,9}_{-1,6}) \text{ кэВ}$ . Полная светимость центра Галактики в диапазоне 10 кэВ — 10 МэВ составляет  $3 \cdot 10^{31} \text{ Вт}$ .

На расстоянии 10 пк от центра расположен остаток сверхновой Стрелец А Восточный (Sgr AE), который удаляется от центра со скоростью 40 км/с. Радиоисточник Стрелец B2 (Sgr B2) представляет собой молекулярное облако размером около 30 пк и массой до  $3 \cdot 10^6 M_\odot$ . Центр окружен молекулярным кольцом радиусом примерно 200 пк, расширяющимся со скоростью 140 км/с и вращающимся со скоростью 50 км/с. Его масса — порядка  $10^7 M_\odot$ . В облаке Sgr B2 наблюдаются компактные зоны НII, мазеры, излучающие в линиях гидроксила и паров воды. В зоне центра обнаружено несколько рентгеновских источников. Один из них совпадает с Sgr AW. Его светимость в диапазоне  $E = 0,5 \div 4,5 \text{ кэВ}$  составляет  $1,5 \cdot 10^{28} \text{ Вт}$ .

#### 45.6. ГАЛАКТИКИ И ВСЕЛЕННАЯ

**Структура и классификация галактик** [66, 67]. Большинство галактик состоит из двух основных звездных компонентов: массивного диска и сфероидального компонента. Яркость сфероидального компонента  $I$  изменяется с радиусом  $r$  по закону

$$\lg I(r)/I_1(0) \approx (r/r_e)^{1/4},$$

где  $r_e$  — эффективный радиус. Яркость дисковой составляющей распределена в плоскости диска по закону

$$I(r)/I_2(0) \approx \exp(-r/r_0),$$

где  $r_0 \approx 2 \div 6$  кпк, а в плоскости, перпендикулярной плоскости диска, — по закону

$$I(z)/I_3(0) \approx \text{ch}^{-2}(z/z_0),$$

где  $z_0 \approx 0,6 \div 0,8$  кпк.

**Эллиптические галактики** [обозначение Еп, где  $n=0, 1, \dots, 7$ , характеризует сжатие галактики  $\epsilon = (a-b)/a$ ,  $n=10$  е] состоят практически только из сфероидального компонента. Их массы — от  $10^5$  до  $10^{13} M_\odot$ , светимости — от  $10^4$  до  $10^{12} L_\odot$ . К этому типу принадлежит почти 25% всех галактик.

В **спиральных галактиках** (обозначение Sa, Sb, Sc в соответствии со степенью развития спиралей) преобладает дисковая составляющая, но сфероидальный компонент присутствует всегда. Выделяют спиральные галактики с перемычкой (SBa, SBb, SBc). Доля галактик этих двух типов составляет почти 50%. Их массы — порядка  $10^8$ — $10^{12} M_\odot$ , светимости  $10^8$ — $10^{11} L_\odot$ . Промежуточными между эллиптическими и спиральными галактиками являются галактики линзовидного типа (SO). К нему принадлежит 20% всех галактик. **Неправильные галактики** IrI и IrII подразделяются по типу их звездного населения (I и II соответственно). Их массы не превышают  $10^{10} M_\odot$ , светимости —  $10^{10} L_\odot$ .

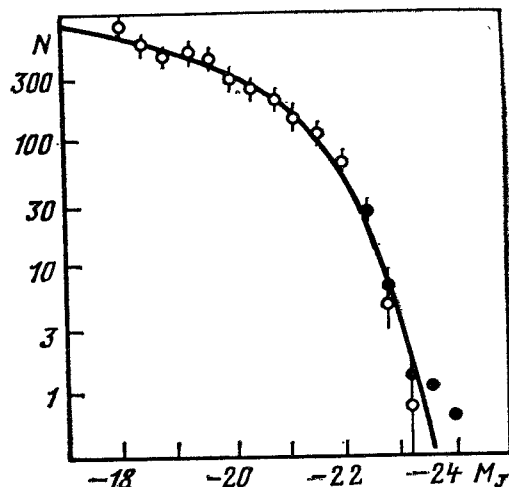


Рис. 45.43. Функция светимости галактик. По оси ординат отложено число галактик  $N$ , по оси абсцисс — абсолютная звездная величина в полосе  $J$ , характеризуемой соотношениями  $\lambda = 0,5 \text{ мк}$ ,  $\Delta\lambda = 0,07 \text{ мк}$ ,  $M_J = M_V + 0,35 (M_B - M_V)$  [54]

Таблица 45.37. Отношение масса — светимость и массовая доля нейтрального водорода для галактик различных типов [48, 67]

| Тип галактик | $(M/L)/(M_\odot/L_\odot)$ | $M_{\text{HI}}/M$ |
|--------------|---------------------------|-------------------|
| E            | 20—40                     | $\sim 0$          |
| SO           | 10                        | 0,005             |
| Sa           | 10                        | 0,03              |
| Sb           | 10                        | 0,05              |
| Sc           | $< 10$                    | 0,07              |
| IrI          | $< 10$                    | 0,2               |

Параметры различных типов галактик приведены в табл. 45.37. Распределение галактик по светимостям  $L$  имеет вид (рис. 45.43)

$$\Phi(L) dL = \Phi^* (L/L^*)^{-1,25} \exp(-L/L^*) d(L/L^*),$$

где  $\Phi^* = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Мпк $^{-3}$ ; светимости  $L^*$  соответствует абсолютная звездная величина  $M_B^* = -21$ . Плотность светимости галактик  $\rho_V = 10^8 L_\odot$  Мпк $^{-3}$ .

Ближайшие к нам галактики объединены в гравитационно связанную систему, называемую Местной

Таблица 45.38. Население Местной группы галактик [3]

| Семейство                | Состав семейства с указанием созвездия, в котором находится галактика | Тип | Расстояние, кпк | Абсолютная звездная величина | Масса, $10^6 M_\odot$ |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| Галактики                | Галактика (центр в Стрельце)                                          | Sb  | 10              | -21                          | 250 000               |
|                          | Большое Магелланово Облако                                            | Ig  | 52              | -18                          | 14 000                |
|                          | Малое Магелланово Облако (Золотая Рыбка)                              | Ig  | 71              | -16                          | 5000                  |
|                          | Печь                                                                  | Er  | 188             | -13                          | 20                    |
|                          | Скульптор                                                             | Er  | 84              | -12                          | 3                     |
|                          | Лев I                                                                 | Er  | 220             | -11                          | 4                     |
|                          | Дракон                                                                | Er  | 76              | -9                           | 0,1                   |
|                          | Малая Медведица                                                       | Er  | 67              | -9                           | 0,1                   |
|                          | Лев II                                                                | Er  | 220             | -9                           | 1                     |
|                          | Пегас                                                                 | Er  | 170             | -9                           | —                     |
|                          | Орион                                                                 | Er  | 80              | -7                           | —                     |
|                          | Козерог                                                               | Er  | 70              | -6                           | —                     |
|                          | Большая Медведица                                                     | Er  | 120             | -6                           | —                     |
|                          | Большая Медведица                                                     | Er  | 130             | —                            | —                     |
|                          | Секстанс С                                                            | Er  | 140             | —                            | —                     |
|                          | Змея                                                                  | Er  | 30              | —                            | —                     |
|                          | Киль                                                                  | Er  | 170             | —                            | —                     |
| Туманности Андромеды     | Андромеда (M31, NGC224)                                               | Sb  | 690             | -22                          | 360 000               |
|                          | Треугольник (M33, NGC598)                                             | Sc  | 720             | -19                          | 20 000                |
|                          | Андромеда (M32)                                                       | E2  | 690             | -16                          | 2600                  |
|                          | Андромеда (NGC205)                                                    | SB0 | 690             | -15                          | 2000                  |
|                          | Кассиопея (NGC 185)                                                   | E3  | 690             | -15                          | 100                   |
|                          | Кассиопея (NGC 147)                                                   | E5  | 690             | -14                          | 150                   |
|                          | Андромеда I                                                           | Er  | 690             | -11                          | 1                     |
|                          | Андромеда II (Рыбы)                                                   | Er  | 690             | -11                          | 1                     |
|                          | Андромеда III                                                         | Er  | 690             | -11                          | 1                     |
|                          | Андромеда IV                                                          | Ig  | 690             | -11                          | 10                    |
| Периферия Местной группы | Рыбы                                                                  | Ig  | 690             | -9                           | 10                    |
|                          | Кассиопея (IC 10)                                                     | Ig  | 1250            | -17                          | 15 000                |
|                          | Кит (IC 1613)                                                         | Ig  | 770             | -15                          | 400                   |
|                          | Стрелец (NGC 6822)                                                    | Ig  | 600             | -15                          | 1500                  |
|                          | Кит (галактика Вольфа — Лундмарка — Меллотта)                         | Ig  | 1300            | -14                          | 300                   |
|                          | Секстанс А                                                            | Ig  | 1300            | -14                          | 1000                  |
|                          | Лев А                                                                 | Ig  | 1100            | -13                          | 400                   |
|                          | Козерог                                                               | Ig  | 1000            | -11                          | 30                    |
|                          | Дева                                                                  | Ig  | 1000            | -11                          | 40                    |
|                          | Скульптор                                                             | Ig  | 1400            | -10                          | 10                    |
|                          | Стрелец                                                               | Ig  | 500             | -9                           | 10                    |

группой (табл. 45.38). Характеристики некоторых других галактик приведены в табл. 45.39.

Таблица 45.39. Некоторые яркие галактики [1]

| Галактика           | Тип   | Диаметр, кпк | Расстояние, Мпк | Абсолютная звездная величина | Масса, $10^6 M_\odot$ |
|---------------------|-------|--------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| NGC 55              | Sc    | 12           | 2,3             | -19,9                        | 10,5                  |
| M81                 | Sb    | 16           | 3,2             | -20,9                        | 11,2                  |
| M82                 | Ir II | 7            | 3               | -19,6                        | 10,5                  |
| NGC 3115            | E7    | 5            | 4               | -19,3                        | 10,9                  |
| M87                 | E1    | 13           | 13              | -21,7                        | 12,6                  |
| M104 «Сомbrero»     | Sa    | 8            | 12              | -22                          | 11,7                  |
| Центавр А (NGC5128) | E0p   | 15           | 4,4             | -20                          | 11,3                  |
| M51 «Водоворот»     | Sc    | 9            | 3,8             | -19,7                        | 10,9                  |
| M83                 | SBc   | 12           | 3,2             | -20,6                        | —                     |

\* Масса видимого вещества. Имеются основания считать, что полные массы многих галактик значительно больше, поскольку они окружены массивными невидимыми коронами.

**Активные галактики и квазары [3].** Активные галактики характеризуются:

наличием компактного ядра со светимостью  $10^{34}$ — $10^{41}$  Вт;

быстрой (месяцы и дни) переменностью излучения; нетепловым спектром с избыточными потоками в радио-, инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах (рис. 45.44);

4) широкими ( $10^3$ — $10^4$  км/с) эмиссионными линиями (рис. 45.45);

5) пекулярным внешним видом, свидетельствующим о взрыве, наличии выбросов типа струй.

Выделяют следующие основные типы активных галактик.

**Сейфертовские галактики** — спиральные (как правило) галактики с маленькими и аномально яркими ядрами. Ширины эмиссионных линий у сейфертовских галактик I типа 1000—3000 км/с, у II типа 500—1000 км/с. Светимость в инфракрасном и оптическом диапазонах  $10^{35}$ — $10^{39}$  Вт. Сейфертовские галактики I типа имеют сравнимые светимости в рентгеновском диапазоне. Спектр в диапазоне  $E=1 \div 100$  кэВ обычно степенной.

**Квазары** — точечные источники светимостью в инфракрасном, оптическом и рентгеновском диапазонах  $10^{36}$ — $10^{41}$  Вт. Ширина эмиссионных линий 4000—6000 км/с. Примерно 1% квазаров являются радиоисточниками мощностью до  $10^{39}$  Вт. Квазары — самые мощные объекты в наблюдаемой Вселенной (рис. 45.46). Самый далекий известный квазар имеет красное смещение  $z=4,04$ .

**Лацертиды (объекты типа BL Ящерицы)** — источники, подобные квазарам. Отличаются отсутствием эмиссионных линий и сильной (10—30%) переменной поляризацией излучения.

**Радиогалактики** — эллиптические (как правило) галактики со светимостью в радиодиапазоне  $10^{35}$ — $10^{38}$  Вт. Большая часть имеет двойную структуру: симметрично относительно центрального источника на расстоянии до нескольких мегапарсек расположено два радиоизлучающих облака. Спектр радиоизлучения обычно степенной (рис. 45.47).

Распределение активных галактик по светимости и спектральным индексам показано на рис. 45.48—45.50.

Скопления галактик [74]. Распределение галактик в пространстве сильно неоднородно. Функция корреляции галактик

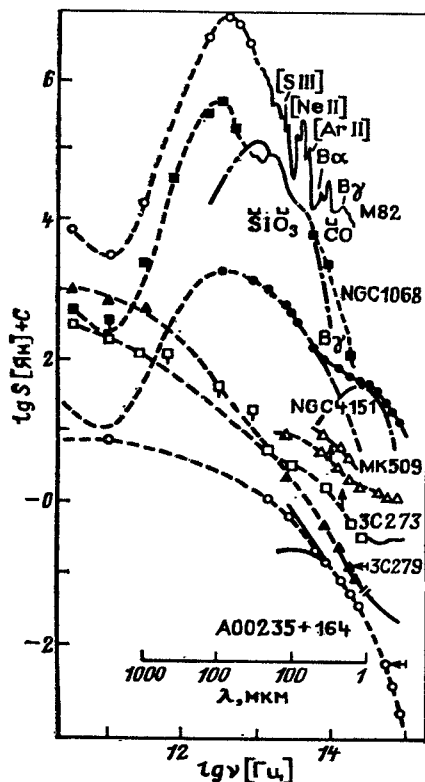


Рис. 45.44. Спектры активных галактик в инфракрасном, оптическом и радиодиапазонах. Для компактности спектры сдвинуты вдоль оси ординат, каждый на определенную величину  $C$ . Приведены спектры «взрывающейся галактики» M82 ( $C=3,77$ ), сейфертовской галактики II типа NGC1068 ( $C=3,07$ ), сейфертовских галактик I типа NGC4151 ( $C=2,5$ ) и MK509 (1,77), квазаров 3C273 ( $C=1$ ) и 3C279 ( $C=2$ ) и лацертида A00235+164 ( $C=0$ ) [68]

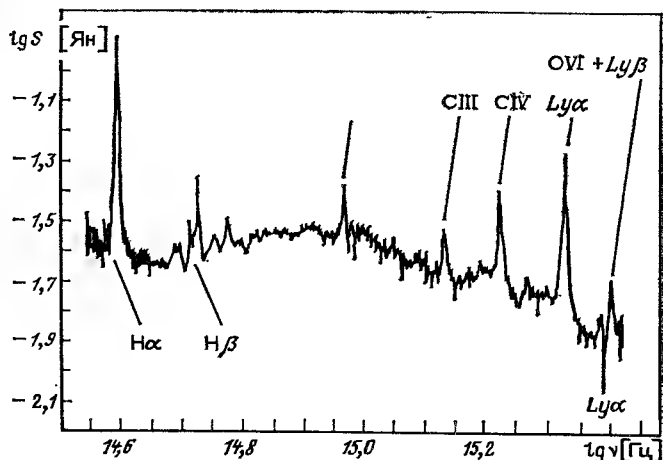


Рис. 45.45. Спектр квазара 3C273 в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах [69]

$$\xi(R) = \langle N(r) N(r+R) - N^2(r) \rangle / \langle N^2(r) \rangle,$$

где  $N$  — плотность галактик, имеет вид [75]  $\xi(R) = (R_0/R)^\gamma$ ,  $R_0 = (4,23 \pm 0,52) h^{-1}$  Мпк;  $\gamma = 1,77(4)$ . Здесь  $h = H/50$ , где  $H$  — постоянная Хаббла, км/(с·Мпк). Эта функция удовлетворяет данным наблюдений при  $R < 20 h^{-1}$  Мпк.

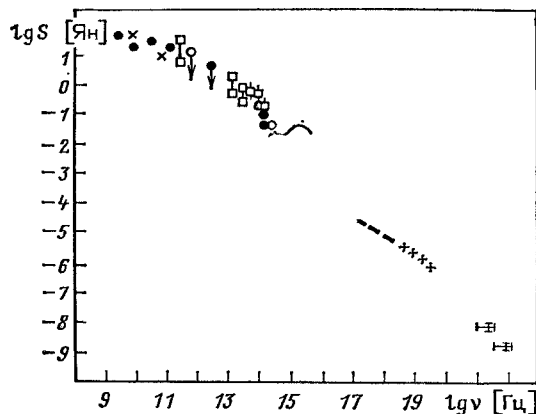


Рис. 45.46. Спектр квазара 3C273 от радио- до  $\gamma$ -диапазона [70]

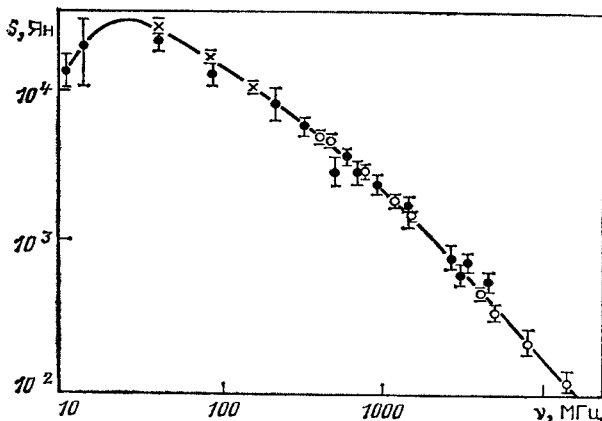


Рис. 45.47. Спектр радиогалактики Лебедь А [54]

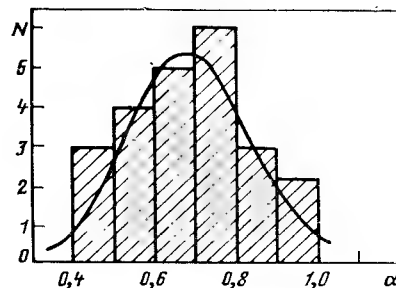


Рис. 45.48. Распределение спектральных индексов  $\alpha$  активных галактик в рентгеновском диапазоне:  $N$  — число галактик;  $\alpha = -d \lg(\text{интенсивность}) / d \lg(\text{частота})$  [71]



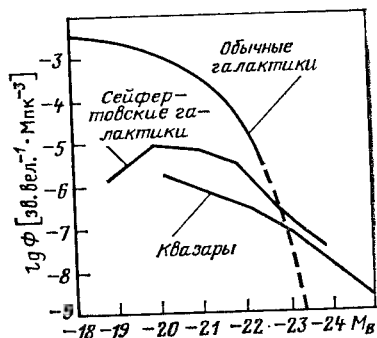


Рис. 45.49. Функция  $\Phi$  светимости активных галактик. По оси абсцисс отложена абсолютная звездная величина в полосе  $B$  [72]

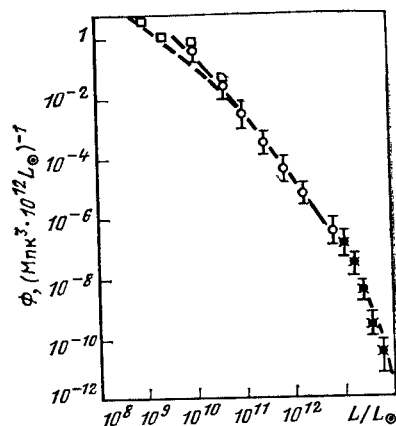


Рис. 45.51. Функция светимости скоплений и групп галактик [3]

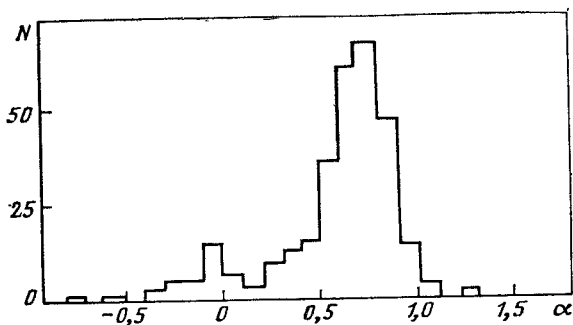


Рис. 45.50. Распределение спектральных индексов  $\alpha$  радиогалактик в диапазоне частот от 178 до 1400 МГц [73]

Значительная часть галактик сосредоточена в скоплениях (рис. 45.51). Типичные массы скоплений  $10^{12}$ — $10^{15} M_{\odot}$ , они содержат сотни и тысячи галактик (табл. 45.40). Богатыми называются скопления, в которых в радиусе  $3h^{-1}$  Мпк от центра скопления содержится не менее 50 галактик в диапазоне от  $m_3$  до  $m_3+2$ , где  $m_3$  — звездная величина третьей по яркости галактики в скоплении. Плотность галактик в центральных частях богатых скоплений распределена по закону Кинга

$$N(r) = N_0 \left(1 + r^2/r_c^2\right)^{-3/2},$$

где  $r_c = 0,25(4) h^{-1}$  Мпк. Полный диаметр скоплений достигает 3—5 Мпк. Скопления заполнены газом с

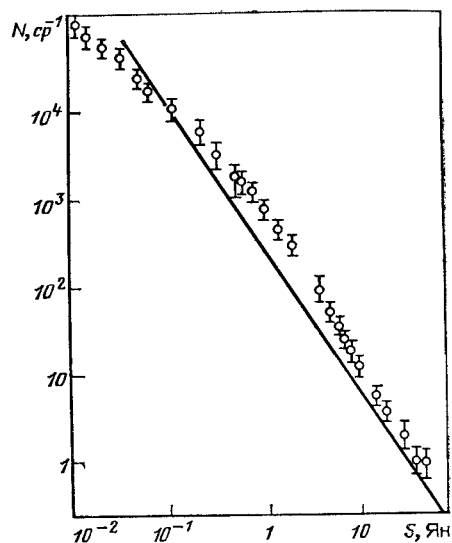


Рис. 45.52. Подсчеты радиисточников на частоте 408 МГц:

сплошная линия — закон  $S^{-3/2}$ . Отклонения от этого закона в области больших  $S$  означают, что в прошлом радиисточников было больше и (или) они были ярче, уплотнение кривой подсчетов при малых  $S$  — результат космологических эффектов [79]

Таблица 45.40. Некоторые скопления галактик

| Скопление               | Число наблюдаемых галактик [1] | Расстояние*, Мпк [2] | Угловой размер, град [2] | Оптическая светимость, $10^{11} L_{\odot}$ [2] | Дисперсия скоростей галактик вдоль луча зрения, км/с [76] | Температура газа, кэВ [78] | Рентгеновская светимость (2—10 кэВ), $10^{37}$ Вт [78] |
|-------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| Персей (A426)           | 500                            | 120                  | 4                        | 10                                             | 1400                                                      | 6,8                        | 12,3                                                   |
| Дева                    | 2500                           | 23                   | 12                       | 12                                             | 700                                                       | 2,2                        | 0,3                                                    |
| Волосы Вероники (A1656) | 800                            | 135                  | 4                        | 50                                             | 900                                                       | 8,8                        | 7,6                                                    |

\* Для  $H = 50$  км/(с · Мпк).

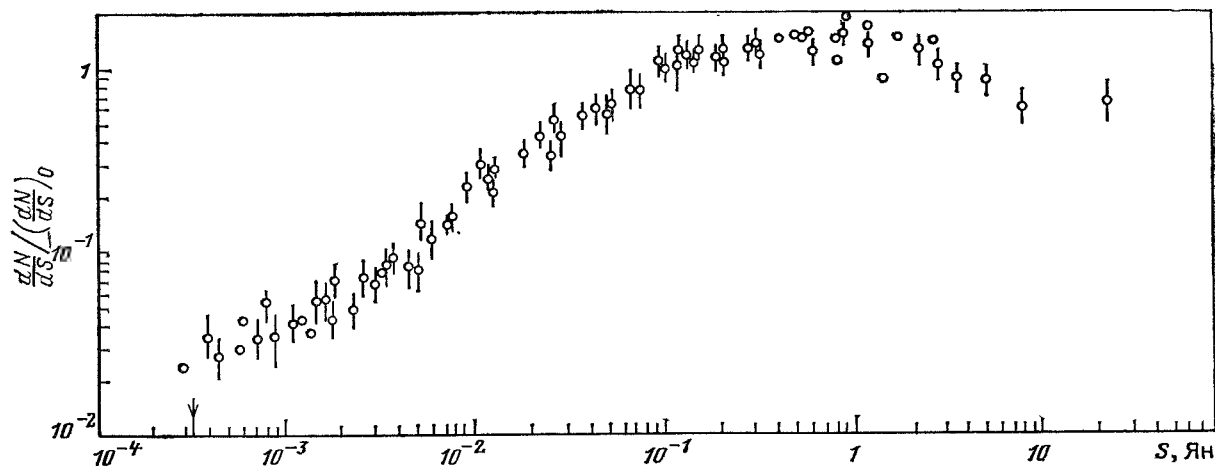


Рис. 45.53. Подсчет радиоисточников на  $\lambda = 21$  см:

кривая  $dN/dS$ ,  $\text{ср}^{-1} \cdot \text{Ян}^{-1}$ , нормирована на закон  $(dN/dS)_0 = 225 S^{-5/2}$ . Отклонение от этого закона в области больших  $S$  свидетельствует о том, что к настоящему времени число радиоисточников уменьшается. Спад в области малых  $S$  связан с неевклидовостью нашего мира [80]

температурой порядка  $10^8$  К и плотностью около  $10^{-3} \text{ см}^{-3}$ . Наблюдается тормозное рентгеновское излучение этого газа. Функция корреляции скоплений в диапазоне  $5 h^{-1} < R < 100 h^{-1}$  Мпк имеет вид [76]

$$\xi(R) = (R_0/R)^\gamma, \quad \gamma = 1,6, \quad R_0 = 50 h^{-1} \text{ Мпк.}$$

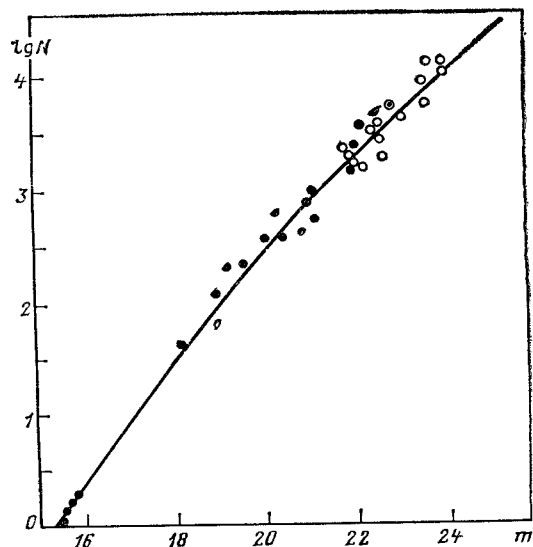


Рис. 45.54. Число галактик  $N(m)$  ярче видимой величины  $m$  на квадратный градус [81]

В еще больших масштабах наблюдаются сверхскопления. Характерный размер сверхскопления — около 30 Мпк, масса — порядка  $10^{16} M_\odot$ . Типичное сверхскопление содержит два-три богатых скопления [77].

Подсчеты источников [79]. В евклидовом мире, однородно заполненном источниками, число источников  $N(S)$ , плотность потока от которых больше  $S$ , удовлетворяет закону  $N \propto S^{-3/2}$  (в дифференциальной форме  $dN/dS \propto S^{-5/2}$ ). Отклонения результатов подсчетов от

этого закона объясняются эволюцией источников, а также космологическими эффектами (рис. 45.52—45.54).

Фоновое излучение (рис. 45.55). В него вносят вклад далекие галактики, горячий межгалактический газ, а также реликтовое излучение (микроволновое фоновое излучение), оставшееся после ранних горячих стадий развития Вселенной. Параметры фонового излучения в различных диапазонах приведены в табл. 45.41.

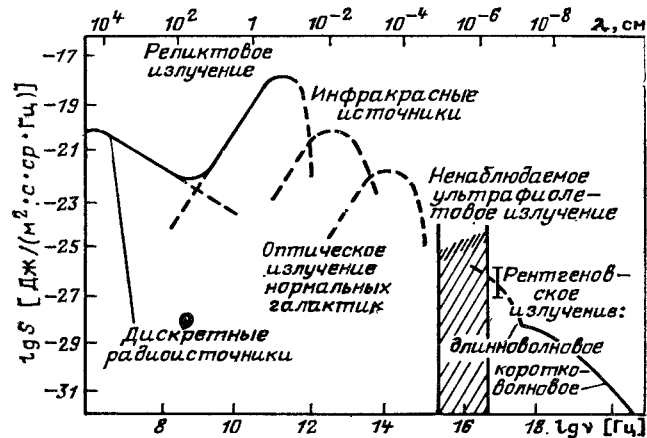


Рис. 45.55. Спектр электромагнитного фонового излучения во Вселенной:

сплошная линия — измерения, пунктир — теоретические оценки [82]

Микроволновое фоновое излучение [83], называемое реликтовым, имеет спектр, близкий к спектру излучения черного тела с температурой  $T = 2,7$  К (рис. 45.56), и характеристики:

плотность энергии  $0,25 \text{ эВ/см}^3$ ;

скорость движения Солнца относительно микроволнового фона  $300\text{--}400 \text{ км/с}$  в направлении  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\delta = 0^\circ$ ;

возникающая в результате движения Солнца дипольная анизотропия яркости  $\delta T/T = 1,3 \cdot 10^{-3} \cos \theta$ , где  $\theta$  — угол между направлением движения и направлением наблюдения;

Таблица 45.41. Плотность энергии и числа фотонов фонового излучения в различных диапазонах [82]

| Диапазон                                                   | Плотность энергии излучения, эВ/см <sup>3</sup> | Плотность числа фотонов, см <sup>-3</sup> |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Длинноволновый радио-диапазон                              | $\sim 10^{-7}$                                  | $\sim 1$                                  |
| Микроволновое фоновое излучение                            | $\sim 0,25$                                     | $\sim 400$                                |
| Инфракрасный                                               | $\sim 10^{-2}$                                  | $\sim 1$                                  |
| Оптический                                                 | $\sim 3 \cdot 10^{-3}$                          | $\sim 10^{-3}$                            |
| Длинноволновый рентгеновский ( $E < 1$ кэВ)                | $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$                        | $3 \cdot (10^{-7} \div 10^{-8})$          |
| Коротковолновый рентгеновский ( $E > 1$ кэВ)               | $\sim 10^{-4}$                                  | $\sim 3 \cdot 10^{-9}$                    |
| $\gamma$ -Излучение:<br>$E = 1 \div 6$ МэВ<br>$E > 10$ МэВ | $\sim 3 \cdot 10^{-5}$<br>$10^{-5}$             | $\sim 10^{-11}$<br>$10^{-12}$             |

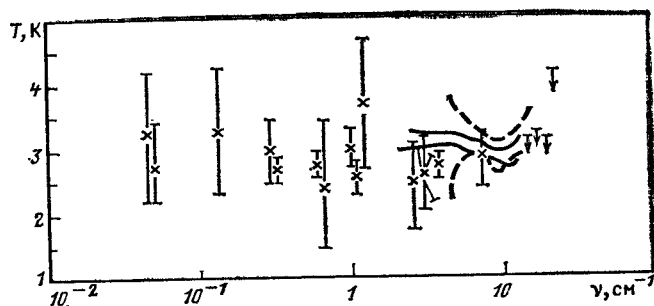


Рис. 45.56. Измерения яркостной температуры  $T$  микроволнового фонового излучения на разных длинах волн [83]

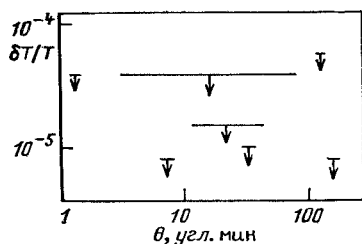


Рис. 45.57. Ограничения на флуктуации температуры микроволнового фонового излучения в различных угловых масштабах [84]

квадрупольная анизотропия яркости  $\delta T < 2 \cdot 10^{-4}$  К. Ограничения на мелкомасштабные флуктуации яркости приведены на рис. 45.57.

**Космология.** Основные параметры нашей Вселенной таковы:

- постоянная Хаббла  $H = 50 \div 100$  км/(с·Мпк);
- критическая плотность вещества (при которой Вселенная оказывается замкнутой)  $\rho_c = 4,7 \cdot 10^{-30} h^2$  г/м<sup>3</sup>, где  $h = H/50$  км/(с·Мпк);
- плотность наблюдаемого вещества  $\rho \approx 10^{-31}$  г/см<sup>3</sup>;

отношение числа барионов к числу фотонов  $N_b/N_\gamma = (3 \div 10) \cdot 10^{-10}$  [85];  
параметр плотности барионов  $\Omega_b = \rho_b/\rho_c$ ,  $0,01 \leq \Omega_b \leq 0,14$  [86];  
плотность реликтовых нейтрино (трех сортов) [88]  $450$  см<sup>-3</sup>;

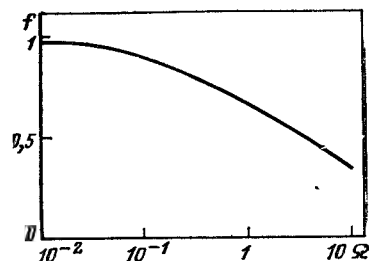


Рис. 45.58. Функция  $f(\Omega)$ , входящая в выражение для возраста Вселенной [85]

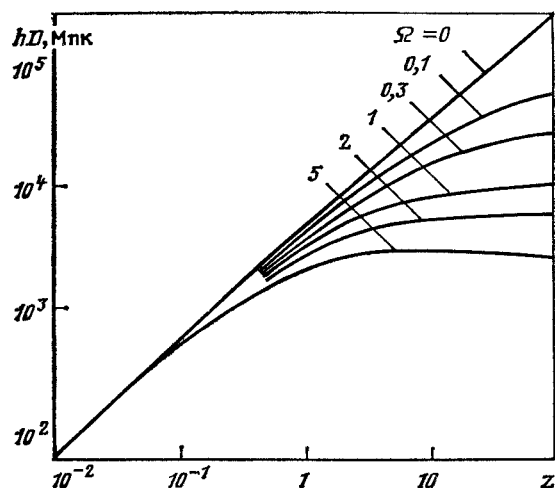


Рис. 45.59. Зависимость расстояния до источника  $D$  от красного смещения  $z$  для различных значений  $\Omega = \rho/\rho_c$ . Расстояние определено таким образом, что плотность потока пропорциональна  $D^{-2}$  [85]

космологическое ограничение на сумму масс нейтрино всех сортов [88]  $\sum m_\nu c^2 < 200$  эВ;

возраст Вселенной в годах  $t = (1,96/h) f(\Omega) \cdot 10^{10}$ , где функция  $f(\Omega)$  показана на рис. 45.58. Здесь  $\Omega$  — плотность всех видов материи, выраженная в единицах критической плотности  $\rho_c$ .

Расширение Вселенной приводит к тому, что излучение далеких источников испытывает красное смещение тем большее, чем дальше источник (рис. 45.59). Поэтому положение источников характеризуется величиной  $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  и  $\lambda$  — длины волн излучения, испущенного и принятого наблюдателем. Неевклидов характер Вселенной иллюстрируется рис. 45.60. Из него видно, что угол, под которым видно тело фиксированного размера, не падает до нуля с увеличением расстояния, а, достигнув определенного минимального значения, начинает расти.

На ранних стадиях эволюции Вселенная была заполнена горячей плазмой, которая охлаждалась в процессе расширения. Приблизительно через 500 с после

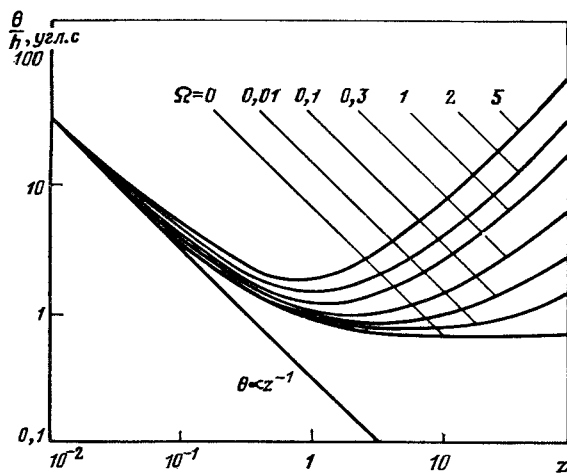


Рис. 45.60. Зависимость углового размера  $\theta$  источника размером 10 кпк от его красного смещения  $z$  [85]

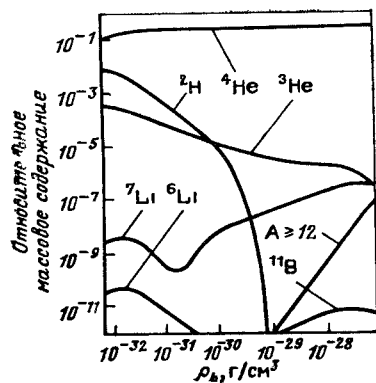


Рис. 45.61. Зависимость относительных содержаний элементов, образовавшихся в ходе космологического нуклеосинтеза, от плотности барионов в настоящее время. Расчеты проведены для современной температуры микроволнового фонового излучения 2,7 К [87]. Измерения дают следующие значения относительного массового содержания:  $^2\text{H}/^1\text{H} \geq 10^{-5}$ ,  $^7\text{Li}/^1\text{H} \approx 10^{-10}$ ,  $(^2\text{H} + ^3\text{He})/^1\text{H} \leq 10^{-4}$  [86]

начала расширения, когда температура упала до  $10^9$  К, прекратились ядерные реакции, которые поддерживали равновесие между нейтронами и протонами. В конце этой стадии происходил интенсивный синтез элементов (рис. 45.61), в частности образовалась большая часть наблюдаемого гелия. Примерно через 200 тыс. лет при  $T=4000$  К произошла рекомбинация водорода (гелий рекомбинировал несколько раньше), после чего Вселенная стала практически прозрачна для заполняющего ее теплового излучения. Благодаря этому становится возможным рост возмущений плотности вещества (до рекомбинации этому препятствовало давление излучения), который в конечном итоге приводит к образованию гравитационно связанных тел — скоплений, галактик и т. д. (рис. 45.62),

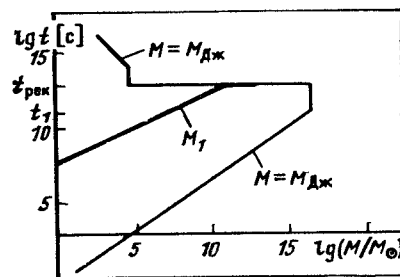


Рис. 45.62. Гравитационная неустойчивость во Вселенной. По оси ординат отложено время от начала расширения Вселенной, по оси абсцисс — масса возмущения ( $\rho\lambda^3$  возм). Отмечены момент  $t_1$ , когда сравниваются плотности вещества и излучения, и момент рекомбинации водорода;  $M_{дж}$  — джинсовская масса (минимальное значение массы, при которой начинается гравитационная неустойчивость);  $M_1$  — максимальная масса возмущений, затухающих к данному моменту времени под действием лучистой вязкости и теплопроводности;  $\Omega=1$  [85]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К. У. *Астрофизические величины*: Пер. с англ./Под ред. Д. Я. Мартынова. Перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1977.
2. Ленг К. *Астрофизические формулы*: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. Т. 1, 2.
3. *Физика космоса: Маленькая энциклопедия*. М.: Советская энциклопедия, 1986.
4. Куликовский П. Г. *Звездная астрономия*. М.: Наука, 1978.
5. Гибсон Э. *Спокойное Солнце*: Пер. с англ./Под ред. Э. В. Кононовича. М.: Наука, 1977.
6. Bahcall J. N., Huebner W. F., Lubow S. H. et al. // *Rev. Mod. Phys.* 1982. Vol. 54, N 3. P. 767—800.
7. Шкловский И. С. *Физика солнечной короны*. М.: Физматгиз, 1962.
8. Воронцов С. В., Жарков В. Н. // *Успехи физ. наук*. 1981. Т. 134, вып. 4. С. 675—710.
9. Поток энергии Солнца и его измерения/Под ред. О. Уайта: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.
10. Крюгер А. *Солнечная радиоастрономия и радиоастрофизика*: Пер. с англ./Под ред. В. З. Зайцева. М.: Мир, 1984.
11. Mercury. 1983. Vol. XII, N 4. P. 118—119.
12. Russel C. T. // *Advances Space Research*. 1981. Vol. 1, N 7. P. 257—264.
13. Маров М. Я. *Планеты Солнечной системы*. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1986.
14. Ip W. H. // *Space Sci. Rev.* 1980. Vol. 26, N 1. P. 39—96.
15. Симоненко А. Н. *Метеориты — осколки астероидов*. М.: Наука, 1979.
16. Чурюмов К. И. *Кометы и их наблюдения*. М.: Наука, 1980.
17. Stern D. P., Ness N. F. // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1982. Vol. 20. P. 139—162.
18. Akasofu S. I. // *Ibid.* P. 117—138.
19. Baranov V. B. // *Comm. Astrophys.* 1981. Vol. IX, N 2. P. 75—91.
20. Курт В. Г. // *Астрофизика и космическая физика*/Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Наука, 1982. С. 268—292.
21. Мартынов Д. Я. *Курс общей астрофизики*. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1979.
22. Grossman A. S., Hays D., Grabaske H. C. // *Astron. Astrophys.* 1974. Vol. 30, N 1. P. 95—103.

23. Кокс Дж. П. Теория звездных пульсаций: Пер. с англ./Под ред. Д. К. Надежина. М.: Мир, 1983.
24. Bath G. T. *Quart. Roy. Astron. Soc.* 1978. Vol. 19, N 2. P. 442—455.
25. Robinson E. L.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1976. Vol. 14. P. 119—142.
26. Горбачкий В. Г. Новоподобные и новые звезды. М.: Наука, 1974.
27. Rydgren A. E., Strom S. E., Strom B. H.//*Astrophys. J. Suppl.* 1976. Vol. 30, N 3. P. 307—336.
28. Cohen M.//*Phys. Rep.* 1984. Vol. 116. N 3. P. 173—232.
29. Гершберг Р. Е. Вспыхивающие звезды малых масс. М.: Наука, 1978.
30. Боярчук А. А.//Итоги науки и техники. Сер. астроном. М.: ВИНТИ, 1983. Т. 22. С. 83—111.
31. Trimble V.//*Rev. Mod. Phys.* 1982. Vol. 54. N 4. P. 1183—1224.
32. Шкловский И. С. Сверхновые звезды. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976.
33. Шапиро С., Тьюкольски С. Белые карлики, черные дыры и нейтронные звезды: Пер. с англ./Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Мир, 1985.
34. Van Horn H. M.//*Phys. Today.* 1979. Vol. 32, N 1. P. 23—30.
35. Смит Ф. Г. Пульсары: Пер. с англ./Под ред. А. Д. Кузьмина. М.: Мир, 1979.
36. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары: Пер. с англ./Под ред. А. Д. Кузьмина. М.: Мир, 1980.
37. Backer D. C., Kulkarni S. R., Heiles C. e. a.//*Nature.* 1982. Vol. 300, N 5893. P. 615—618.
38. Liang H. P., Nolan P. L.//*Space Sci. Rev.* 1984. Vol. 38, N 314. P. 353—384.
39. White N.//*Advances Space Res.* 1984. Vol. 3, N 10—12. P. 9—18.
40. Borner G.//*Phys. Rep.* 1980. Vol. 60, N 3. P. 153—203.
41. White N. E., Swank J. H., Holt S. S.//*Astrophys. J.* 1983. Vol. 270, N 2. P. 711—734.
42. Sunyaev R. A., Trumper J.//*Nature.* 1979. Vol. 279. P. 506—508.
43. Holt S. S., McCray R.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1982. Vol. 20. P. 323—366.
44. Мазец Е. П., Голенецкий С. В.//Астрофизика и космическая физика/Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Наука, 1982. С. 216—267.
45. Владимирский Б. М., Гальпер А. М., Лучков Б. И. и др.//Успехи физ. наук. 1985. Т. 145, вып. 2. С. 255—284.
46. Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. М.: Наука, 1984.
47. Kinematics, Dynamics and Structure of the Milky Way/Ed. by W. L. H. Shuter. Dordrecht: D. Reidel. 1983.
48. Faber S. M., Gallagher J. S.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1979. Vol. 17. P. 135—188.
49. Bachall J. N., Soneira R. M.//*Astrophys. J. Suppl.* 1980. Vol. 44, N 1. P. 73—110.
50. Ефремов Ю. Н.//Итоги науки и техники. Сер. астроном. М.: ВИНТИ, 1985. Т. 27. С. 102—203.
51. Холопов П. Н. Звездные скопления. М.: Наука, 1981.
52. Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Физика межзвездной среды. М.: Наука, 1979.
53. Бочкарев Н. Г.//Звезды и звездные системы/Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Наука, 1981. С. 265—325.
54. Лонгейр М. С. Астрофизика высоких энергий: Пер. с англ./Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Мир, 1985.
55. Тернер Б. Е.//Галактическая и внегалактическая радиоастрономия/Под ред. Г. Л. Верскера и К. И. Келлермана: Пер. с англ. М.: Мир, 1976. С. 303—371.
56. Костякова Е. Б. Физика планетарных туманностей. М.: Наука, 1982.
57. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1985.
58. Псковский Ю. П.//Звезды и звездные системы/Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Наука, 1981. С. 88—117.
59. Лозинская Т. А.//Итоги науки и техники. Сер. астроном. М.: ВИНТИ, 1983. Т. 22. С. 33—82.
60. Моран М. В.//На переднем крае астрофизики/Под ред. Ю. Эвретта: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 405—458.
61. Спитцер Л. Физические процессы в межзвездной среде. Пер. с англ./Под ред. Д. А. Варшавовича. М.: Мир, 1981.
62. Habing H. J., Israel F. P.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1979. Vol. 17. P. 345—383.
63. Schwartz R. D.//*Ibid.* 1983. Vol. 21. P. 209—238.
64. Oort J. H.//*Ibid.* 1977. Vol. 15. P. 295—362.
65. Центр Галактики/ Под ред. Г. Р. Риглера и Р. Д. Блендфорда: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
66. Засов А. В.//Итоги науки и техники. Сер. астроном. М.: ВИНТИ, 1981. Т. 18. С. 3—47.
67. Тейлер Р. Дж. Галактики: строение и эволюция: Пер. с англ./Под ред. А. Г. Дорошкевича. М.: Мир, 1981.
68. Rieke G. H., Lebofsky M. J.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1979. Vol. 17. P. 447—512.
69. Puetter R. C., Burbidge E. M., Smith H. E. e. a.//*Astrophys. J.* 1982. Vol. 257. P. 487—498.
70. Ulrich M. H.//*Space Sci. Rev.* 1981. Vol. 28, N 1. P. 89—104.
71. Mushotsky R. F.//*Advances Space Research.* 1984. Vol. 3, N 10—12. P. 157—166.
72. Meurs E. J., Wilson A. A.//*Astron. Astrophys.* 1984. Vol. 136, N 1. P. 206—226.
73. Пахольчик А. Радиогалактики: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.
74. Bahcall N.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1977. Vol. 15. P. 505—540.
75. Пиблс Ф. Дж. Структура Вселенной в больших масштабах: Пер. с англ./Под ред. А. Г. Дорошкевича. М.: Мир, 1983.
76. Клыпин А. А., Копылов А. И.//Письма в астроном. журн., 1983. Т. 9, № 2. С. 75—81.
77. Oort J. H.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1983. Vol. 21. P. 373—407.
78. Mushotsky R. F., Serlemitsos P. J., Smith B. W. e. a.//*Astrophys. J.* 1978. Vol. 225, N 1. P. 21—38.
79. Лонгейр М.//Успехи физ. наук. 1969. Т. 99, вып. 2. С. 229—248.
80. Windhorst R. Ph. D. Thesis. University of Leiden, 1984.
81. Караченцев И. О., Копылов А. И.//Письма в астроном. журн. 1977. Т. 3, № 6. С. 246—250.
82. Лонгейр М. С., Сюняев Р. А.//Успехи физ. наук. 1971. Т. 105, вып. 1. С. 41—96.
83. Weiss R.//*Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1980. Vol. 18. P. 489—536.
84. Partridge R. B.//*Phys. Scripta.* 1980. Vol. 21, N 2. P. 624—629.
85. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
86. Yang J., Turner M. S., Steigman G.//*Astrophys. J.* 1984. Vol. 281, N 2. P. 493—511.
87. Дэвис М.//На переднем крае астрофизики/Под ред. Ю. Эвретта: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 494—546.
88. Зельдович Я. Б., Сюняев Р. А.//Письма в астроном. журн. 1980. Т. 6, № 8. С. 451—456.

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

К. А. Кикоин

Периодическая система отражает закон изменения физико-химических свойств элементов с изменением заряда ядра  $Z$  и числа электронов во внешней оболочке атомов (периодический закон).

В первоначальном варианте таблицы Д. И. Менделеева элементы располагались в порядке возрастания атомных масс и группировались по сходству химических свойств. Объяснение периодическому закону и структуре периодической системы в дальнейшем было дано на основе квантовой теории строения атома. Оказалось, что последовательность расположения элементов в таблице определяется зарядом ядра, а периодичность физико-химических свойств связана с существованием электронных оболочек атома, постепенно заполняющихся с возрастанием  $Z$ .

Состояние электрона в атоме зависит от главного квантового числа  $n$ , орбитального квантового числа  $l$ , его проекции  $m$ , спинового числа  $s$  и его проекции  $\sigma$ . Электроны с разными  $n$  и  $l$  образуют разные оболочки. С учетом принципа Паули число электронов в оболочке с индексом  $l$  не может быть больше  $2(2l+1)$ . В зависимости от значения  $l=0, 1, 2, 3, \dots$  оболочки обозначают буквами  $s, p, d, f, g, h, i, k, l, m, \dots$

Современная таблица химических элементов построена таким образом, что при переходе от какого-либо элемента к следующему заряд ядра увеличивается на единицу и к оболочке добавляется один электрон. Заряд ядра определяет порядковый номер элемента.

По способу заполнения электронных оболочек все элементы разбиты на периоды. В первый период входят два элемента (H, He), у которых застраивается 1  $s$ -оболочка. Второй и третий периоды содержат по восемь элементов, у которых застраиваются сначала  $s^2$ -оболочки ( $2s^2$  и  $3s^2$ ), а затем  $p^6$ -оболочки ( $2p^6$  и  $3p^6$ ). Первые три периода обычно называют малыми.

Периоды с четвертого по седьмой занимают в таблице по два ряда; их обычно называют большими. У элементов четвертого и пятого периодов прежде всего застраиваются  $s^2$ -оболочки ( $4s^2$  и  $5s^2$ ). После этого заполняются  $d^{10}$ -оболочки предыдущих слоев ( $3d^{10}$  и  $4d^{10}$ ), и, наконец,  $p^6$ -оболочки ( $4p^6$  и  $5p^6$ ). Оба эти периода содержат по 18 элементов.

Оболочки элементов шестого и седьмого периодов также застраиваются в одинаковой последовательности: сначала заполняются внешние  $s$ -оболочки ( $6s^2$  и  $7s^2$ ), после этого появляется один электрон в предыдущей  $d$ -оболочке (в атомах La и Ac), но у последующих элементов в основном заполняются глубокие  $f$ -оболочки ( $4f^{14}$  и  $5f^{14}$ ) и лишь после этого достраиваются  $d$ -оболочки ( $5d^{10}$  и  $6d^{10}$ ).

Элементы, у которых заполняются не внешние, а более глубокие оболочки, называют переходными. Так, в четвертом периоде к переходным относятся элементы от Sc до Zn, у которых застраиваются 3  $d$ -оболочки, в пятом — от Y до Cd (4  $d$ -переходные элементы), в шестом — от La до Hg, в седьмом — все актиноиды.

Седьмой период остался недостроенным, поскольку у элементов с  $Z > 83$  отсутствуют устойчивые изотопы, причем их нестабильность возрастает с увеличением  $Z$ . Таблица, таким образом, заканчивается последним из полученных искусственным путем элементов с  $Z=107$ . Неустановившиеся названия, недостроенные электронные конфигурации и гипотетические массовые числа наиболее долгоживущих изотопов радионуклидов приведены в скобках.

Взаимодействие электронов в оболочках приводит к тому, что у некоторых элементов оболочки заполняются не так, как им предписывает система: в четвертом периоде в атомах Cr и Cu число  $d$ -электронов увеличивается на два по сравнению с предшествующими им V и Ni за счет одного из 4  $s$ -электронов; в пятом периоде подобная «аномалия» наблюдается у Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, причем у Pd  $d$ -оболочку «переходят» оба 5  $s$ -электрона; наконец, в шестом периоде на один  $s$ -электрон меньше, чем остальные, имеют атомы Os, Pt и Au; в  $f$ -переходных металлах конкурируют по энергии  $f$ - и  $d$ -состояния, поэтому у некоторых элементов очередной электрон попадает не в 4  $f$ - (5  $f$ )-оболочку, а в 5  $d$ - (6  $d$ )-оболочку: это происходит у Gd, Tb, Lu в группе редких земель и у Pa, U, Np, Cm, Bk, Lw — в группе актиноидов.

Кроме горизонтального разделения элементов в таблице по периодам производится вертикальное разделение их по группам. Элементы, входящие в каждую группу, имеют одинаковое строение внешних электронных оболочек. В помещенное на форзаце «коротком» варианте таблицы каждый из больших периодов разбит на два ряда, помещенных один под другим, поэтому наряду с главными группами возникают побочные. В первых двух группах главную подгруппу составляют элементы, имеющие соответственно один и два  $s$ -электрона на внешней оболочке (2, 3, 4, 6, 8 и 10-й ряды), а в побочную подгруппу выделяются элементы с незаполненными  $d$ -оболочками (5, 7 и 9-й ряды). В группах с III по VII переходные элементы относятся к побочным подгруппам (4, 6, 8 и 10-й ряды), а элементы с незаполненными  $p$ -оболочками — к главным (2, 3, 5, 7 и 9-й ряды). Водород может быть отнесен к первой главной подгруппе как имеющий один электрон в  $s$ -оболочке и к седьмой, поскольку ему не хватает до заполненной оболочки одного электрона (см. пунктирную линию на рис. 46.1, которая указывает на эти две возможности). У элементов инертных газов, составляющих восьмую группу, застроены все оболочки. Эти элементы замыкают периоды. Названия элементов главных подгрупп в таблице смещены влево, а побочных — вправо. В отдельных группы (триады) выделены переходные элементы с почти заполненными  $d$ -оболочками (группы железа, палладия и платины). Особые группы составляют также элементы с застраиваемыми  $f$ -оболочками (лантаноиды и актиноиды).

Многие физические свойства элементов связаны с положением, которое они занимают в периодической системе. Так, атомные массы элементов возрастают с увеличением порядкового номера (исключение из этого правила составляют пары Ag—K, Co—Ni, Te—I); к магнитному упорядочению способны только металлы с незаполненными 3- и 4-й оболочками (исключением является твердый кислород), а сверхпроводящими свойствами в основном обладают парамагнитные переходные металлы четвертого — седьмого периодов; полупроводники располагаются в середине периодов в главных подгруппах III, IV и VI, а полуметаллы — в главной подгруппе V; все периоды заканчиваются диэлектрическими кристаллами. Отчетливую периодичность обнаруживают и другие физические свойства.

Для выявления закономерностей изменения физических свойств элементов удобно располагать их в «длинную» периодическую систему, в которой всем элемен-

|      |       |       |       |       |       |        |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1 H  | 3 Li  | 11 Na | 19 K  | 37 Rb | 55 Cs | 87 Fr  |
| 2 He | 4 Be  | 12 Mg | 20 Ca | 38 Sr | 56 Ba | 88 Ra  |
|      | 5 B   | 13 Al | 21 Sc | 39 Y  | 57 La | 89 Ac  |
|      | 6 C   | 14 Si | 22 Ti | 40 Zn | 58 Ce | 90 Th  |
|      | 7 N   | 15 P  | 23 V  | 41 Nb | 59 Pr | 91 Pa  |
|      | 8 O   | 16 S  | 24 Cr | 42 Mo | 60 Nd | 92 U   |
|      | 9 F   | 17 Cl | 25 Mn | 43 Tc | 61 Pm | 93 Np  |
|      | 10 Ne | 18 Ar | 26 Fe | 44 Ru | 62 Sm | 94 Pu  |
|      |       |       | 27 Co | 45 Rh | 63 Eu | 95 Am  |
|      |       |       | 28 Ni | 46 Pd | 64 Gd | 96 Cm  |
|      |       |       | 29 Cu | 47 Ag | 65 Tb | 97 Bk  |
|      |       |       | 30 Zn | 48 Cd | 66 Dy | 98 Cf  |
|      |       |       | 31 Ga | 49 In | 67 Ho | 99 Es  |
|      |       |       | 32 Ge | 50 Sn | 68 Er | 100 Fm |
|      |       |       | 33 As | 51 Sb | 69 Tm | 101 Md |
|      |       |       | 34 Se | 52 Te | 70 Yb | 102 No |
|      |       |       | 35 Br | 53 I  | 71 Lu | 103 Lr |
|      |       |       | 36 Kr | 54 Xe | 72 Hf | 104 Rf |
|      |       |       |       |       | 73 Ta | 105 Nb |
|      |       |       |       |       | 74 W  | 106 Db |
|      |       |       |       |       | 75 Re | 107 Bh |
|      |       |       |       |       | 76 Os |        |
|      |       |       |       |       | 77 Ir |        |
|      |       |       |       |       | 78 Pt |        |
|      |       |       |       |       | 79 Au |        |
|      |       |       |       |       | 80 Hg |        |
|      |       |       |       |       | 81 Tl |        |
|      |       |       |       |       | 82 Pb |        |
|      |       |       |       |       | 83 Bi |        |
|      |       |       |       |       | 84 Po |        |
|      |       |       |       |       | 85 At |        |
|      |       |       |       |       | 86 Rn |        |

Рис. 46.1. «Длинная» периодическая система элементов

там, имеющим одинаковую структуру внешних электронных оболочек, отводится по отдельной группе [1]. Длинную таблицу нередко изображают в компактной ступенчатой форме (рис. 46.1), располагая периоды один за другим симметрично относительно оси таблицы, и соединяя линиями элементы, принадлежащие к одной группе [2]. Другая форма длинной таблицы использована для построения периодической системы

физических свойств элементов (см. таблицу на форзаце). В этой таблице представлены атомные и термодинамические характеристики физических элементов в твердой кристаллической фазе при атмосферном давлении. Указан тип решетки, в которой элемент кристаллизуется при температуре 20 °С (для веществ, которые при нормальных условиях находятся в жидком или газообразном состоянии, указана фаза, в которую они переходят в результате охлаждения при атмосферном давлении). Приведены атомные и ионные радиусы (по Полингу) для основных валентностей элементов, а также температуры кипения, плавления, магнитных и сверхпроводящих переходов. Для немагнитных кристаллов указан тип магнитной восприимчивости (парамагнитная или диамагнитная). Приведены также значения температуры Дебая, определенные для большинства элементов из данных по теплоемкости при температуре 20 °С.

Диэлектрики, полупроводники, полуметаллы и металлы выделены соответственно шрифтом (светлый, штриховка, сетка и жирный),

Литературные источники, из которых взяты данные по температурам фазовых переходов, приведены в соответствующих разделах Справочника (см. гл. 12, 21, 27, 28). Значения температуры Дебая взяты в основном из обзора [3], а недостающие в нем данные — из [4]. Остальные характеристики элементов в кристаллической фазе приведены в соответствии с [5, 6].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lexikon der Physik*: Bd 3. Stuttgart, 1969.
2. *Handbuch der Physik*. Bd 36, Springer Verlag, 1956.
3. *Cschneider K. A. J. Sol. State Phys.* 1964. Vol. 16. P. 275.
4. Ашкрофт Н., Мермин Н. *Физика твердого тела*. М.: Мир, 1979.
5. *Физический энциклопедический словарь*. М.: Советская энциклопедия, 1960—1969.
6. *Энциклопедия неорганических материалов*. Киев: Высшая школа, 1977.

### МЮОН

Масса  $m_\mu = 1,883\,532\,7(11) \cdot 10^{-28}$  кг = 0,113 428 913(17) а.е.м.

$$m_\mu c^2/\{e\} = 105,658\,389(34) \text{ МэВ}$$

Магнитный момент  $\mu_\mu = 4,490\,451\,4(15) \cdot 10^{-26}$  Дж·Тл<sup>-1</sup>

$$\mu_\mu/\mu_N = 8,890\,598\,1(13)$$

Аномалия магнитного момента  $a_\mu = \frac{\mu_\mu}{e\hbar/(2m_e)} - 1 = 1,165\,923\,0(84) \cdot 10^{-8}$  g-фактор,

$$g_\mu = 2(1 + a_\mu) = 2,002\,331\,846(17)$$

### ПРОТОН

Масса  $m_p = 1,672\,623\,1(10) \cdot 10^{-27}$  кг = 1,007 276 470(12) а.е.м.

$$m_p c^2/\{e\} = 938,272\,31(28) \text{ МэВ}$$

Отношение массы протона к массе электрона  $m_p/m_e = 1836,152\,701(37)$

Удельный заряд  $e/m_p = 9,578\,830\,9(29) \cdot 10^7$  Кл·кг<sup>-1</sup>

Комптоновская длина волны  $\lambda_{C,p} = 1,321\,410\,02(12) \cdot 10^{-15}$  м

Магнитный момент  $\mu_p = 1,410\,607\,61(47) \cdot 10^{-26}$  Дж·Тл<sup>-1</sup>

$$\mu_p/\mu_N = 2,792\,847\,386(63)$$

Поправка на диамагнитное экранирование для сферического образца H<sub>2</sub>O при 25 °С,

$$1 - \frac{\mu_p}{\mu'_p} = 25,689(15) \cdot 10^{-6}$$

Магнитный момент без поправки на диамагнетизм

$$\mu'_p = 1,410\,571\,38(47) \cdot 10^{-26} \text{ Дж·Тл}^{-1}$$

Гиромагнитное отношение  $\gamma_p = 26\,752\,212\,8(81) \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>·Тл<sup>-1</sup>

### НЕЙТРОН

Масса  $m_n = 1,674\,928\,6(10) \cdot 10^{-27}$  кг = 1,008 664 904(14) а.е.м.

Отношение массы нейтрона к массе протона  $m_n/m_p = 1,001\,378\,404(9)$

Комптоновская длина волны  $\lambda_{C,n} = h/(m_n c) = 1,319\,591\,10(12) \cdot 10^{-15}$  м

Магнитный момент\*  $\mu_n = 0,966\,237\,07(40) \cdot 10^{-26}$  Дж·Тл<sup>-1</sup>

\* Скалярная величина магнитного момента.

$$\mu_n/\mu_N = 1,913\,042\,75(45)$$

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Авогадро постоянная  $N_A = 6,022\,136\,7(36) \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>

Атомная единица массы  $m_u = m(^{12}\text{C})/12 = 1,660\,540\,2(10) \cdot 10^{-27}$  кг

$$m_u c^2/\{e\} = 931,494\,32(98) \text{ МэВ}$$

Атмосфера стандартная, 1 атм — 101 325 Па (точно)

Больцмана постоянная  $k = R/N_A = 1,380\,658(12) \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>

Излучение постоянная первая  $c_1 = 2\pi\hbar c^2 = 3,741\,774\,9(22) \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>

$$\text{вторая } c_2 = \hbar c/k = 0,014\,387\,69(12) \text{ м·К}$$

Объем моля идеального газа при  $T = 273,15$  К и  $p = 101\,325$  Па,

$$V^m = RT/p = 22,414\,10(19) \text{ л/моль}$$

Стефана — Больцмана постоянная  $\sigma = \pi^2 k^2/(60\hbar^3 c^2) = 5,670\,51(19) \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>

Ускорение силы тяжести (стандартное)  $g_n = 9,806\,65 \text{ м·с}^{-2}$  (точно)

Универсальная газовая постоянная  $R = 8,314\,510(70) \text{ Дж·моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$

Фарадея постоянная  $F = N_A e = 96\,485,309(29) \text{ Кл·моль}^{-1}$

Электрон-вольт {e}, 1 эВ = 1,602 177 33(49) · 10<sup>-19</sup> Дж



## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Скорость света в вакууме  $c = 299\,792\,458\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (точно)  
 Магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7} = 12,566\,370\,614\cdot 10^{-7}\text{ Гн}\cdot\text{м}^{-1}$  (точно)  
 Электрическая постоянная  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817\cdot 10^{-12}\text{ Ф}\cdot\text{м}^{-1}$  (точно)  
 Гравитационная постоянная  $G = 6,672\,59(85)\cdot 10^{-11}\text{ м}^3\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-2}$   
 Планка постоянная  $h = 6,626\,075\,5(40)\cdot 10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с}$   
 Планковская масса  $(\hbar c/G)^{1/2} = m_{\text{Pl}} = 2,176\,71(14)\cdot 10^{-6}\text{ кг}$   
 длина  $\hbar/(m_{\text{Pl}}c) = l_{\text{Pl}} = 1,616\,05(10)\cdot 10^{-35}\text{ м}$   
 время  $l_{\text{Pl}}/c = t_{\text{Pl}} = 5,390\,56(34)\cdot 10^{-44}\text{ с}$

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Элементарный заряд  $e = 1,602\,177\,33(49)\cdot 10^{-19}\text{ Кл}$   
 Квант магнитного потока  $\Phi_0 = h/(2e) = 2,067\,834\,61(61)\cdot 10^{-15}\text{ Вб}$   
 Джозефсона отношение  $2e/h = 4,835\,976\,7(14)\cdot 10^{14}\text{ Гц}\cdot\text{В}^{-1}$   
 Квант холловского сопротивления  $R_{\text{H}} = h/e^2 = 25\,812,805\,6(12)\text{ Ом}$   
 Бора магнетон  $\mu_{\text{B}} = eh/(2m_e) = 9,274\,015\,4(31)\cdot 10^{-24}\text{ Дж}\cdot\text{Тл}^{-1}$   
 $\mu_{\text{B}}/\{e\} = 5,788\,382\,63(52)\cdot 10^{-5}\text{ эВ}\cdot\text{Тл}^{-1}$   
 Ядерный магнетон  $\mu_{\text{N}} = eh/(2m_p) = 5,050\,786\,6(17)\cdot 10^{-27}\text{ Дж}\cdot\text{Тл}^{-1}$   
 $\mu_{\text{N}}/\{e\} = 3,152\,451\,66(28)\cdot 10^{-8}\text{ эВ}\cdot\text{Тл}^{-1}$

## АТОМНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Тонкой структуры  $\alpha = \mu_0 ce^2/(2\hbar) = 7,297\,353\,08(33)\cdot 10^{-3}$   
 $\alpha^{-1} = 137,035\,989\,5(61)$   
 Ридберга постоянная  $R_{\infty} = me\alpha^2/(2\hbar) = 10\,973\,731,534(13)\text{ м}^{-1}$   
 $R_{\infty}e = 3,289\,841\,949\,9(39)\cdot 10^{15}\text{ Гц}$   
 $R_{\infty}\hbar c/\{e\} = 13,605\,698\,1(40)\text{ эВ}$   
 Бора радиус  $a_0 = \alpha/(4\pi R_{\infty}) = 0,529\,177\,249(24)\cdot 10^{-10}\text{ м}$   
 Хартри энергия  $E_{\text{H}} = 2R_{\infty}\hbar c = 4,359\,748\,2(26)\cdot 10^{-18}\text{ Дж}$   
 $E_{\text{H}}/\{e\} = 27,211\,396\,1(81)\text{ эВ}$

## ЭЛЕКТРОН

Масса  $m_e = 9,109\,389\,7(54)\cdot 10^{-31}\text{ кг} = 5,485\,799\,03(13)\cdot 10^{-4}\text{ а. е. м.}$   
 $m_e c^2/\{e\} = 0,510\,999\,06(15)\text{ МэВ}$   
 Удельный заряд  $-e/m_e = -1,758\,819\,62(53)\cdot 10^{11}\text{ Кл}\cdot\text{кг}^{-1}$   
 Молярная масса  $M_e = 5,485\,799\,03(13)\cdot 10^{-7}\text{ кг/моль}$   
 Комптоновская длина волны  $\lambda_{\text{C}} = h/(m_e c) = 2,426\,310\,58(22)\cdot 10^{-12}\text{ м}$   
 Классический радиус  $r_e = \alpha^2 a_0 = 2,817\,940\,92(38)\cdot 10^{-15}\text{ м}$   
 Томсоновское сечение рассеяния  $\sigma_e = (8\pi/3)r_e^2 = 0,665\,246\,16(18)\cdot 10^{-28}\text{ м}^2$   
 Магнитный момент  $\mu_e = 928,477\,01(31)\cdot 10^{-26}\text{ Дж}\cdot\text{Тл}^{-1}$   
 $\mu_e/\mu_{\text{B}} = 1,001\,159\,652\,193(10)$   
 Аномалия магнитного момента  $a_e = \mu_e/\mu_{\text{B}} - 1 = 1,159\,652\,193(10)\cdot 10^{-3}\text{ g-фактор,}$   
 $g_e = 2(1 + a_e) = 2,002\,319\,304\,386(20)$